



**Viabilidad de Aplicación de Last Planner System en Proyectos de Rehabilitación de
Pavimentos Aeroportuarios, Caso de Estudio Calle de Rodaje Alfa, Aeropuerto Alfonso
Bonilla Aragón**

Juan David Londoño Restrepo

Cristian Mateo Prieto Barrera

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Directora de Tesis: Sandra Liliana Cano Moya

Mayo 2026

Agradecimientos

Expresamos nuestra sincera gratitud a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

A nuestra directora, la Doctora Sandra Liliana Cano Moya, por su orientación rigurosa, su acompañamiento constante y su disposición permanente a guiarnos a lo largo de este proceso. Sus observaciones y su exigencia académica fueron determinantes para elevar la calidad de esta investigación.

A la Pontificia Universidad Javeriana Cali y a la Facultad de Ingeniería y Ciencias, por la formación recibida durante estos años y por brindarnos las herramientas conceptuales y metodológicas que sustentan este trabajo.

A Masterplac S.A.S y al equipo del proyecto de rehabilitación de la calle de rodaje Alfa, por permitirnos el acceso a la obra, a la información y a la experiencia de campo sin la cual este estudio no habría sido posible. Agradecemos especialmente al Ing. Jorge Rojas por su disposición a compartir su conocimiento y a apoyar la implementación del sistema en condiciones operativas reales.

A la Ingeniera Vanessa Rivera, Coordinadora de Planeación y Programación de la concesión aeroportuaria, por su invaluable aporte conceptual sobre el desarrollo operativo aeroportuario y por guiarnos en la comprensión de las actividades en plataforma desde la perspectiva de la concesión. Su conocimiento fue clave para darle rigor técnico a este trabajo.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, su paciencia y su aliento en cada etapa de este camino. Su respaldo fue el soporte que nos permitió sostener el esfuerzo hasta el final.

Para N.V.M., porque detrás de cada página escrita hubo palabras tuyas dándome fuerza para continuar. Gracias por tu amor incondicional, por creer en mí y por caminar a mi lado incluso en los momentos más agotadores. Este logro también lleva un poco de ti.

Y a ti, Ketta, que estuviste presente en cada momento de duda, de cansancio y de incertidumbre. Todo lo que está a tu alrededor siempre termina moviéndose contigo. Agradezco que este camino lo hayamos recorrido juntos.

1. Introducción

La infraestructura aeroportuaria constituye uno de los activos más importantes para la competitividad y conectividad regional. En este contexto, el mantenimiento y la rehabilitación de las áreas de movimiento, específicamente las calles de rodaje, representan un desafío de ingeniería que trasciende la ejecución estrictamente constructiva. Las intervenciones en estos entornos están supeditadas a una condición de borde: la Seguridad Operacional (Safety), entendida como la mitigación sistemática de riesgos para garantizar la continuidad ininterrumpida de las operaciones aéreas. Esta condición exige que los proyectos cumplan con los estándares técnicos de calidad. Adicionalmente, requiere una coordinación logística que minimice las interferencias con el tráfico de aeronaves. Bajo este marco, también se debe asegurar el cumplimiento de los plazos contractuales.

Tradicionalmente, la gestión de proyectos de pavimentación se ha fundamentado en enfoques de planificación estáticos, los cuales resultan vulnerables ante la variabilidad inherente a los frentes de obra. En el caso específico de la rehabilitación de la calle de rodaje Alfa, esta complejidad se agudizó debido a una zonificación estricta impuesta por la autoridad aeroportuaria, la cual limitó la liberación de frentes a ventanas de oportunidad operativas en las intersecciones Charlie, Bravo y Delta. Frente a este escenario, los métodos de control convencionales evidencian sus limitaciones para gestionar la incertidumbre y asegurar la eficiencia en la asignación de recursos.

Para abordar esta problemática, la presente investigación documenta la aplicación de un procedimiento integrado de planificación y seguimiento, diseñado para articular sinérgicamente el Last Planner System (LPS) y la Gestión del Valor Ganado (EVM) en un entorno de restricción exigente. Mientras que el LPS actúa como el mecanismo para proteger el flujo de producción a través de la planificación colaborativa y la liberación proactiva de restricciones, el EVM se incorpora como la métrica objetiva para evaluar el desempeño financiero y el cumplimiento del cronograma maestro. Este enfoque busca validar la viabilidad de un modelo de control que concilie la gestión de la variabilidad en campo con los requerimientos corporativos de reporte de desempeño.

En este sentido, el estudio describe la articulación operativa entre la planificación macro y la ejecución táctica diaria, detallando el despliegue del cronograma maestro, el Lookahead

Planning de dos semanas (2WLAP) y el Plan de Trabajo Semanal (WWP). Bajo este enfoque integrador, se desarrolla un análisis basado en indicadores clave de desempeño (KPIs) que correlacionan la fiabilidad del flujo, medida por el Porcentaje de Plan Completado (PPC), con la salud del proyecto, evaluada mediante el Índice de Desempeño del Costo (CPI) y el Índice de Desempeño del Cronograma (SPI). Complementariamente, se examinan métricas de productividad (H-H/unidad, losas/día) y eficiencia operativa (variabilidad en tiempos de suministro y ensayos de calidad), aportando una visión integral del rendimiento en obra.

Finalmente, este trabajo busca demostrar que la convergencia entre la planificación colaborativa y el control de gestión riguroso no solo es viable en la complejidad de un aeropuerto, sino que constituye una ventaja estratégica capaz de garantizar la predictibilidad, la rentabilidad y la seguridad técnica en la ejecución de infraestructuras de transporte.

1.1. Planteamiento Del Problema

La rehabilitación de pavimentos rígidos en infraestructuras aeroportuarias constituye un desafío multidimensional que trasciende la ejecución técnica convencional. En estos proyectos, la intervención constructiva coexiste con un aeropuerto en plena operación. Cualquier desviación en la planificación impacta de forma directa la seguridad operacional (Safety), la programación de vuelos y la logística integral del terminal.

Este es el escenario del proyecto de intervención en la calle de rodaje Alfa del Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón. La exigencia de cumplimiento del cronograma es rígida, con plazos contractuales fijos en los que la interdependencia de actividades condiciona constantemente la ruta crítica.

El entorno aeroportuario impone un ecosistema de restricciones logísticas y operativas exigentes. El ingreso de personal y maquinaria está sujeto a protocolos de autorización con credenciales de renovación mensual. Los reportes de avance diarios se documentan mediante formatos de coordinación con el Control de Tránsito Aéreo (ATC), validados con el área de coordinación y planeación de mantenimiento de la concesión. La movilidad en la plataforma exige escolta operativa, cumplimiento de normativas de seguridad operacional frente a aeronaves en tránsito y supervisión por parte del operador (Aerocali), orientada a garantizar la calidad técnica y el cumplimiento de la programación.

A pesar de este marco de control, los precedentes históricos del proyecto evidencian vulnerabilidades. En intervenciones previas de reposición de losas se han registrado retrasos significativos y no conformidades de calidad, incrementando el nivel de exigencia y

responsabilidad sobre el contratista actual. La evidencia empírica en el sector de infraestructura demuestra que la planificación tradicional carece de la flexibilidad necesaria para gestionar la variabilidad. Este enfoque, fundamentado en modelos deterministas y estáticos de conversión, como el Método de la Ruta Crítica gestionado vía MS Project, presenta limitaciones para anticipar la variabilidad, coordinar actores multidisciplinarios y remover las restricciones propias de un entorno de alta incertidumbre.

En consecuencia, el núcleo del problema no es estrictamente técnico, sino de diseño del sistema de producción y control. En un ecosistema donde la continuidad del servicio aéreo es la máxima prioridad, un cronograma estático es inoperante; se requiere un sistema de planificación dinámico, colaborativo y fundamentado en la liberación de flujos de trabajo. La literatura documenta casos de éxito bajo enfoques preventivos; por ejemplo, la rehabilitación de pistas en Adelaide, Australia, donde la identificación y remoción anticipada de amenazas al flujo permitió ejecutar las obras sin afectación a las operaciones aéreas (Low & Scanlon, 2012).

Bajo esta premisa, surge el cuestionamiento sobre qué marco metodológico puede garantizar la confiabilidad del cronograma en estas condiciones de borde. Desde su conceptualización en 1992, adaptando los principios del Sistema de Producción Toyota, la filosofía Lean Construction (Koskela, 1992) abrió el campo conceptual sobre el cual Ballard y Howell desarrollarían posteriormente el Last Planner System (Ballard, 2000).

Diversos estudios respaldan que el LPS incrementa la confiabilidad de los compromisos, fomenta el trabajo colaborativo y reduce de manera significativa la variabilidad (Botero, 2006). En el contexto colombiano, la aplicación del Last Planner ha mostrado avances documentados en proyectos de construcción (Botero & Álvarez, 2005).

No obstante, su implementación sistemática en la rehabilitación de pavimentos rígidos bajo operación aeroportuaria simultánea sigue siendo incipiente y escasamente documentada. Esta carencia evidencia un vacío de conocimiento empírico respecto a la adaptación y efectividad del LPS en entornos donde las restricciones de seguridad añaden capas excepcionales de complejidad a la planificación intermedia.

Por consiguiente, el problema de investigación radica en determinar cómo la adaptación e implementación del Last Planner System impacta el desempeño del proyecto de rehabilitación en la calle de rodaje Alfa, específicamente en la reducción de la variabilidad operativa, el cumplimiento de hitos clave y la optimización de recursos. A través de este estudio de caso empírico en el Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón, la investigación

busca generar evidencia científica y práctica que valide al LPS como una herramienta esencial para la gestión de certidumbre en infraestructuras de transporte estratégicas.

1.2. Justificación

La rehabilitación de pavimentos rígidos en infraestructuras aeroportuarias es una operación sensible, donde cualquier desviación o ineficiencia en la gestión compromete directamente la seguridad operacional y la continuidad del servicio aéreo. Ante la vulnerabilidad del sistema de producción bajo enfoques tradicionales, resulta imperativo explorar y validar herramientas de control avanzadas que mitiguen la incertidumbre y optimicen el desempeño del proyecto en función de la triple restricción: tiempo, costo y alcance.

En este sentido, el presente trabajo de investigación se justifica primordialmente por la necesidad de evaluar la viabilidad empírica del Last Planner System (LPS) en el contexto de la rehabilitación aeroportuaria. Si bien los impactos de la implementación de Lean Construction han sido evaluados en Latinoamérica (Alarcón et al., 2008), su aplicación en entornos aeroportuarios permanece escasamente documentada.

Desde la perspectiva académica, este estudio de caso aportará evidencia empírica que contribuya a cerrar dicha brecha de conocimiento, estableciendo un marco de referencia teórico-práctico para futuras investigaciones enfocadas en la planificación colaborativa y la teoría de flujos en infraestructura crítica.

Desde la dimensión profesional, los hallazgos de esta investigación proporcionarán un instrumento de valor estratégico para constructoras, operadores aeroportuarios y entidades reguladoras. Al demostrar cómo el LPS fomenta la coordinación temprana entre actores, reduce sistemáticamente los desperdicios, tales como tiempos de espera o reprocesos, y asegura el cumplimiento de plazos contractuales fijos, la investigación trasciende el ámbito académico para consolidarse como una herramienta de aplicación industrial directa. Finalmente, este estudio se alinea con las macro tendencias globales de innovación, eficiencia y sostenibilidad en la gestión de proyectos de ingeniería. La transición hacia sistemas de producción más colaborativos y flexibles representa no solo una ventaja competitiva decisiva para las organizaciones ejecutoras, sino un beneficio directo para la sociedad, garantizando el mantenimiento de infraestructuras de transporte seguras, resilientes y gestionadas eficientemente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar la viabilidad de la aplicación del Last Planner System (LPS) en proyectos de rehabilitación de pavimentos rígidos aeroportuarios, a partir de un caso de estudio aplicado en el Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón.

1.3.2. Objetivos Específicos

El objetivo general pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar el estado actual del proceso de planificación y control de la construcción de la rehabilitación de pavimentos rígidos por medio del cálculo de indicadores de desempeño (KPI's)
- Aplicar la herramienta del LPS adaptada a las restricciones y condiciones de la etapa final del proyecto de rehabilitación de pavimentos rígidos del Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón.
- Evaluar la aplicación del LPS a través de la comparación de los KPI's calculados en la etapa inicial y final del proyecto de rehabilitación de pavimentos rígidos del Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón.

1.3.3. Proposición De Viabilidad

Esta investigación se orienta a verificar la siguiente proposición: la aplicación adaptada del Last Planner System (LPS) en la rehabilitación de pavimentos rígidos aeroportuarios, bajo condiciones de operación simultánea, constituye una alternativa viable al modelo de gestión tradicional en cuanto a fiabilidad del flujo, desempeño financiero-temporal y seguridad operacional.

Dado que el diseño metodológico corresponde a un estudio de caso único, la proposición no se plantea como hipótesis estadística generalizable, sino como un enunciado contrastable empíricamente con base en la evidencia recolectada durante la ejecución del proyecto. La verificación se desarrolla mediante el análisis comparativo entre la Etapa 1 (línea base de gestión tradicional) y la Etapa 2 (intervención Lean) a lo largo de tres dimensiones de desempeño:

- Fiabilidad del flujo, medida mediante el Porcentaje de Plan Completado (PPC) y el análisis de las Causas de No Cumplimiento (CNC).
- Desempeño financiero y temporal, evaluado mediante los Índices de Desempeño del Costo (CPI) y del Cronograma (SPI) de la metodología de Gestión del Valor Ganado (EVM).
- Productividad operativa y seguridad, cuantificada mediante los indicadores de losas por día, consumo de Horas-Hombre y Horas-Máquina por unidad de producción, así como mediante el balance de incidentes en el área de movimiento.

El cumplimiento simultáneo de estas tres dimensiones, contrastado frente al desempeño de la línea base, permite verificar la proposición y dar respuesta integral al objetivo general de la investigación. El resumen conceptual de la propuesta integrada del presente trabajo de grado se puede observar en la Figura 1.

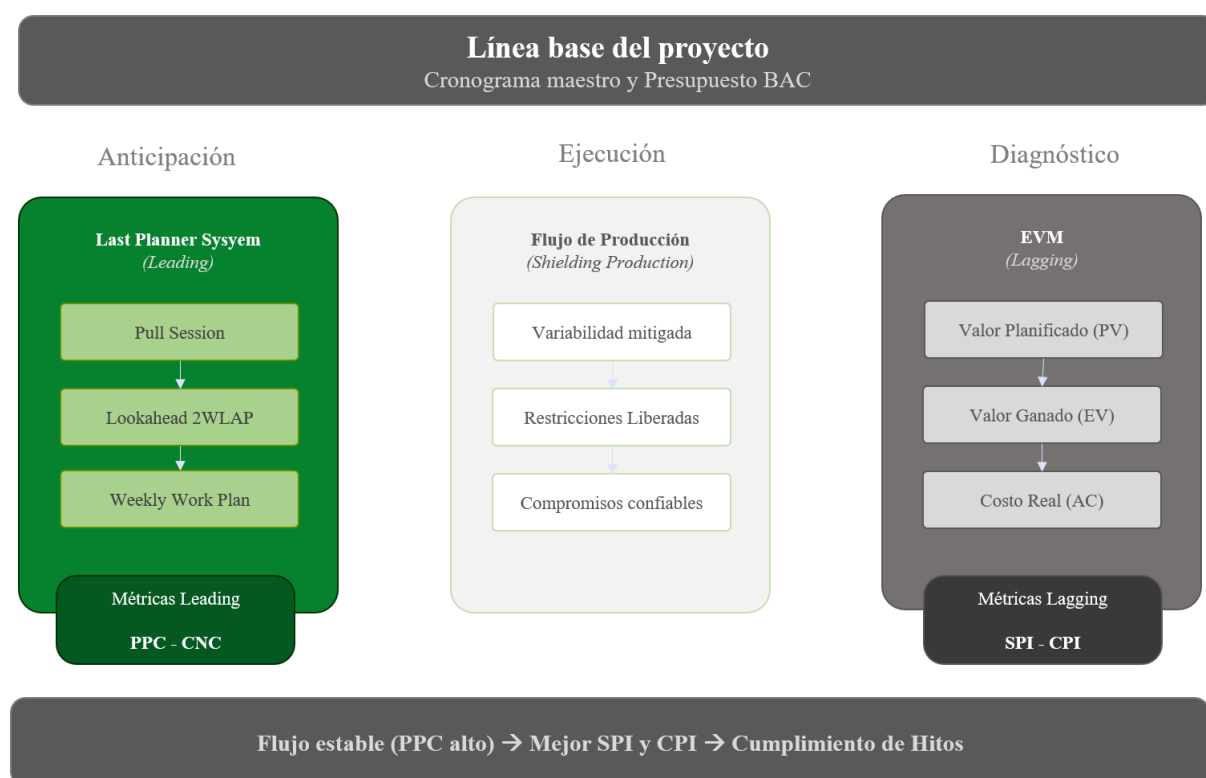


Figura 1. Esquema de conceptual de la propuesta integrada (LPS – EVM)

Nota: Fuente - Elaboración propia

1.4. Alcance y Limitaciones Del Trabajo

La presente investigación se enmarca como un estudio empírico aplicado con un enfoque experimental-explicativo. El diseño metodológico se fundamenta en el análisis de un caso de estudio único: la rehabilitación de pavimentos rígidos en la calle de rodaje Alfa del Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón.

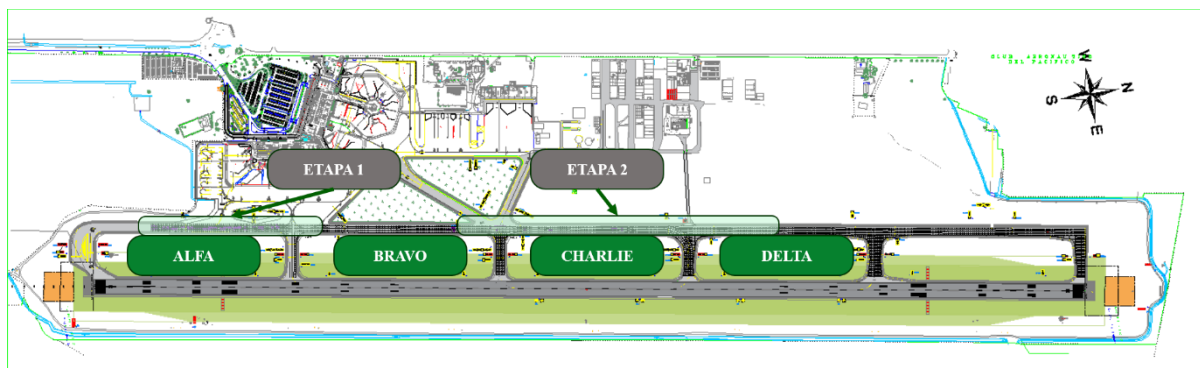


Figura 2. Esquema general de zonas de intervención de pavimentos a rehabilitar – Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón.

Nota: Fuente - Elaboración propia.

El alcance central del trabajo radica en evaluar la viabilidad operativa y técnica de la implementación del Last Planner System (LPS) en un entorno de logística sensible. Para cumplir con este propósito, la investigación se orienta a demostrar que la transición hacia un modelo de planificación colaborativa y remoción anticipada de restricciones permite estabilizar el flujo de trabajo, proporcionando así la evidencia empírica necesaria para validar la efectividad y pertinencia del sistema bajo las estrictas condiciones del entorno aeroportuario.

Para delimitar rigurosamente el objeto de estudio, la investigación abarca de manera exclusiva la recopilación, análisis e interpretación de datos relacionados con la planificación, el control de la ejecución y el desempeño de obra (KPIs y EVM). Por consiguiente, quedan explícitamente excluidos del alcance los aspectos técnicos del diseño estructural del pavimento, los cálculos de dimensionamiento y las pruebas de laboratorio de materiales que no estén vinculados de forma directa al análisis del rendimiento y la gestión de la producción.

El diseño y la aplicación del modelo LPS se adaptaron a las condiciones de frontera del Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón. Factores exógenos como la normativa aeronáutica local, las dinámicas de operación de la plataforma y el esquema contractual vigente condicionan los resultados obtenidos. Por esta razón, su extrapolación a otros contextos requiere validaciones adicionales. No obstante, la estructura del modelo de control y los

hallazgos validados constituyen un referente metodológico adaptable para proyectos de infraestructura de características o complejidad similares, tanto en el ámbito académico como profesional.

Por último, la comparación entre Etapa 1 y Etapa 2 se realiza bajo condiciones operativas equivalentes, pero con magnitudes presupuestarias diferentes (80% vs 20% del BAC total). Por esta razón, el análisis comparativo se fundamenta en indicadores adimensionales (CPI, SPI, PPC) y no en valores absolutos.

1.5. Estructura Del Documento

El presente trabajo de investigación se estructura en seis capítulos, organizados lógicamente para guiar al lector a través de la identificación del problema, el diseño metodológico, la implementación del sistema y la validación empírica de los resultados. La estructura del documento se detalla a continuación:

- Capítulo 1. Introducción: Contextualiza la problemática de investigación, estableciendo la justificación, los objetivos, el alcance y las limitaciones que delimitan rigurosamente el estudio.
- Capítulo 2. Marco teórico y conceptual: Expone los fundamentos técnicos y teóricos que sustentan la investigación. Aborda la naturaleza de los pavimentos rígidos aeroportuarios, los retos de gestión en entornos operativos críticos y las bases de la filosofía Lean Construction, el Last Planner System (LPS) y análisis por método de valor ganado (EMV)
- Capítulo 3. Metodología: Describe el diseño de investigación aplicada con enfoque experimental-explicativo. Presenta el caso de estudio de la calle de rodaje Alfa, los métodos de recolección de información, el diagnóstico inicial y la evaluación de madurez organizacional para la adopción del LPS.
- Capítulo 4. Propuesta de Aplicación del LPS: Desarrolla el diseño táctico y la aplicación escalonada del sistema de control en la obra. Explica la articulación de los niveles de planificación (maestra, intermedia y semanal), las rutinas de gestión y la estructuración de métricas de desempeño, como el Porcentaje de Plan Completado (PPC) y la gestión de restricciones.
- Capítulo 5. Análisis de Resultados y Discusión: Contrasta los datos obtenidos durante la fase de implementación del LPS frente a la línea base de gestión tradicional,

evaluando la viabilidad del modelo a través de la sinergia entre los indicadores operativos de flujo y las métricas financieras de Valor Ganado (EVM).

Asimismo, integra un análisis estadístico y cualitativo de las Causas de No Cumplimiento (CNC), permitiendo identificar los factores raíz de la variabilidad y su impacto en el desempeño global. Este capítulo funciona como la instancia de validación empírica, donde se discute cómo la liberación de restricciones y el aprendizaje derivado de las CNC estabilizaron el sistema de producción en el entorno aeroportuario.

- Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones: Sintetiza los hallazgos empíricos en función de los objetivos planteados, reflexiona sobre los aportes de la investigación a la industria y formula recomendaciones tanto para la empresa como para otros proyectos de rehabilitación aeroportuaria que enfrenten retos de planificación y control de obra.

2. Marco Teórico y Conceptual

2.1. Rehabilitación De Pavimentos Rígidos Aeroportuarios

La rehabilitación de pavimentos rígidos en la calle de rodaje Alfa exige una secuencia constructiva de precisión, ejecutada bajo limitaciones logísticas y espaciales. Desde la perspectiva de la gestión de la producción, cada actividad requiere una planificación meticulosa para mitigar la variabilidad técnica y asegurar un flujo de trabajo continuo. A continuación, se detallan las fases constructivas, los equipos involucrados y las restricciones operativas enfrentadas en campo.

2.1.1. Fase 1: Trazado, Corte y Logística De Abastecimiento

El proceso inicia con la liberación topográfica de los módulos de intervención (losas de 6.10 x 6.10 m), identificados mediante un sistema de coordenadas de ejes alfanuméricos (ej. C5, D59). Una vez validados, se procede al corte perimetral con disco diamantado. En esta etapa surge una restricción logística de abastecimiento: la plataforma aeroportuaria carece de puntos de red hídrica. Para evitar el sobrecalentamiento de los discos por fricción, fue necesario diseñar un circuito de suministro transportando agua desde un acopio ubicado a 200 metros de distancia, utilizando tanques de 5 m³ equipados con válvulas de descarga, garantizando así el flujo ininterrumpido de refrigeración y, posteriormente, de curado.

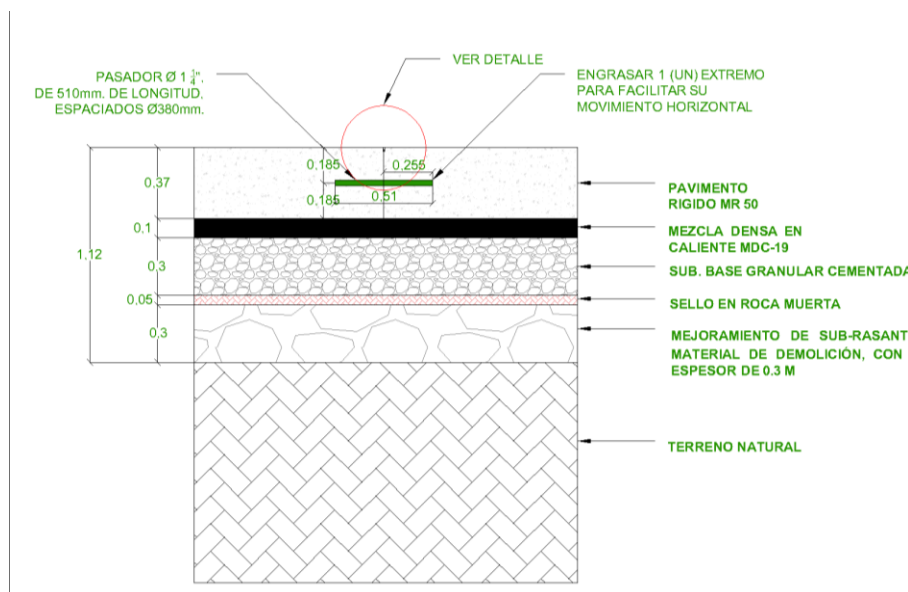


Figura 3. Plano de sección transversal de pavimento.

Nota: Fuente – Elaboración Propia

El diseño del corte contempló dejar una cenefa perimetral de 30 cm en todos los bordes de la losa. Esta franja de amortiguamiento cumple una función estructural determinante: protege las losas contiguas sanas y las dovelas de transferencia de carga existentes contra la vibración generada durante la demolición central.

2.1.2. Fase 2: Demolición, Gestión De Materiales y Control De Riesgos

La demolición se estructuró dividiendo el trabajo según la capacidad de los equipos. La zona central de la losa, compuesta por concreto MR 45 de 30 cm de espesor, se fracturó utilizando una retroexcavadora de oruga de 24 toneladas con martillo neumático. Por su parte, la cenefa de 30 cm se demolió con equipos de menor impacto (minicargadores con martillo o compresores neumáticos manuales) para prevenir fisuraciones inducidas en los paños vecinos.

Durante esta etapa, el sistema de producción debió gestionar dos variables complejas:

- **Economía de materiales:** Se estableció la reutilización de aproximadamente el 50% del concreto demolido para conformar las capas inferiores de soporte. Esto exigió fragmentar el escombros a un tamaño máximo de 30 cm.
- **Mitigación de FOD (Foreign Object Debris):** Para evitar que los fragmentos de concreto representaran un riesgo para las aeronaves, se dispuso de cuadrillas permanentes con escobillones industriales dedicadas exclusivamente a la limpieza en tiempo real, operando a la par de la maquinaria.

2.1.3. Fase 3: Excavación y Estabilización De La Subrasante

El retiro del material se ejecutó separando el flujo de demolición del flujo de carga (asignando equipos independientes) para optimizar el ciclo de las volquetas, las cuales transportaban el material sobrante a botaderos certificados. La excavación se realizó hasta una cota de 1.12 metros bajo el nivel de la rasante. Dado el riesgo de precipitaciones que pudieran comprometer la capacidad portante del cajeado, se implementaron pozos de achique preventivos con bombas sumergibles.

La compactación de la subrasante evidenció restricciones espaciales significativas. En módulos aislados, el área de 6.10 x 6.10 m limitaba la maniobrabilidad, obligando al uso de vibrocompactadores menores de 2 toneladas. En contraste, cuando se liberaban módulos contiguos, se utilizaban equipos de 12 toneladas, mejorando el rendimiento. Tras realizar los ensayos de laboratorio correspondientes (Proctor Modificado), se verificó la densidad en sitio con densímetro nuclear, exigiendo un mínimo del 90% para la liberación de la capa.

Fase 4: Estructura de Soporte y Vulnerabilidad Climática Aprobada la subrasante, se instaló una capa de 30 cm de escombros reutilizados, sellada superficialmente con 5 cm de material granular (recepto recuperado de la excavación). Sobre este sello, se conformó una base granular de 30 cm estabilizada con cemento al 5%.

Esta estabilización química presentó sensibilidad a factores exógenos. La dosificación requirió un esparcido uniforme, para lo cual se adaptó un telehandler tipo spreader. El mezclado se realizó in situ y la nivelación se ejecutó con minicargador, ya que el espacio disponible impedía el uso de motoniveladoras. Posteriormente, la mezcla se humedeció mediante carrotanque y se compactó. El riesgo principal radicaba en las condiciones meteorológicas: cualquier precipitación durante el extendido activaba prematuramente la reacción del cemento, arruinando la base antes de lograr su nivelación. Finalmente, tras 7 días de curado, se validó la densidad al 100% del Proctor Modificado.

Fase 5: Capa de Transición y Cuellos de Botella en Perforación Tras la imprimación y su respectiva rotura, se extendió una capa de Mezcla Densa en Caliente (MDC-19) de 10 cm, compactada con rodillo metálico vibratorio. Esta capa asfáltica cumple la función de distribuir cargas, aislar la humedad y proveer una plataforma geométrica exacta para el pavimento rígido.

El paso posterior representó el mayor cuello de botella operativo del proceso: la perforación para anclajes. Se requirieron perforaciones horizontales de 1 1/2" para instalar dovelas lisas de 50 cm de longitud, espaciadas cada 38 cm. La presencia de acero en las losas existentes generaba la rotura constante de las brocas de gran formato, las cuales no son insumos de alta disponibilidad comercial. Esto representaba un riesgo continuo de desabastecimiento.

La fijación se realizó con adhesivos epóxicos estructurales, inyectados mediante pistolas dosificadoras a batería. La exigencia de alineación y nivelación es alta, dado que cualquier desfase induce esfuerzos cortantes sobre la dovela. Por esta razón, la perforación y el armado de canastillas y parrillas de refuerzo inferior (acero de 1/2" cada 20 cm) fueron asignados a cuadrillas especializadas, con el fin de proteger la continuidad del trabajo.

Fase 6: Fundición, Control Termodinámico y Curado El vaciado de las losas (37 cm de espesor en concreto MR 50) impuso retos termodinámicos sustanciales. El alto contenido de cemento necesario para alcanzar la resistencia especificada genera calores de hidratación elevados. Para prevenir patologías por contracción plástica, la colocación se programó invariablemente a las 4:00 a.m., utilizando agua refrigerada en la planta productora para garantizar temperaturas de mezcla inferiores a 30 °C.

El entorno de fundición fue controlado mediante la instalación de carpas de 6 x 12 m equipadas con cerramientos de geotextil para anular la incidencia del viento y la radiación solar temprana. El vaciado integró tecnología avanzada de nivelación (laser screed), reglas vibratorias (Magic screed) y herramientas de alisado (Big Blue), acompañadas de reductores químicos de evaporación. Tras el texturizado superficial y la aplicación de curador tipo antisol blanco, se realizaron los cortes de juntas de contracción. El ciclo concluyó con un curado húmedo ininterrumpido durante 7 días utilizando mantas de geotextil saturadas de agua, asegurando la maduración estructural del pavimento antes de su liberación al tráfico aéreo y 7 días después con el sello elastomérico de las juntas perimetrales.

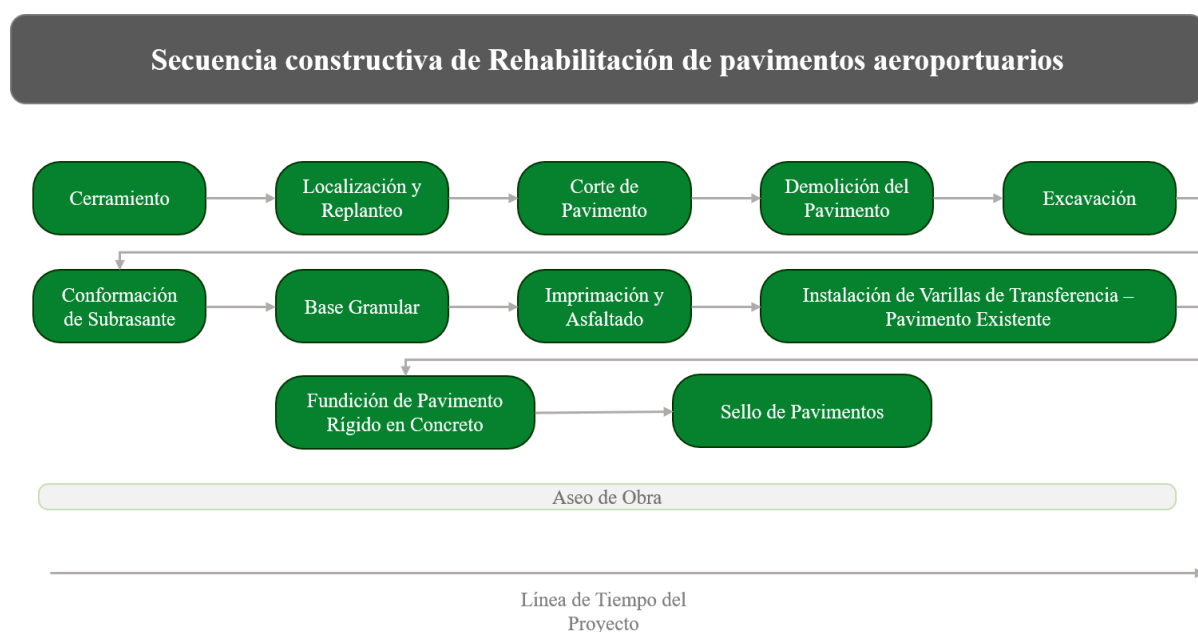


Figura 4. Esquema de secuencia constructiva de rehabilitación de losas aeroportuarias.

Nota: Fuente – Elaboración propia

2.2. Gestión De Proyectos Aeroportuarios

La ejecución de proyectos de infraestructura dentro de un aeropuerto activo difiere diametralmente de la obra civil convencional. Toda intervención en el Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón está estrictamente supeditada a la normativa aeronáutica internacional, los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC) (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil [Aerocivil], 2021), el Programa Nacional de Seguridad de la Aviación Civil y el plan de operaciones del operador concesionario (Aerocali). Al desarrollarse las obras en la "Zona Aire" (área de movimiento y calles de rodaje), la eficiencia productiva

queda condicionada a una condición de borde: la garantía de la Seguridad Operacional (Safety) y la Seguridad de la Aviación (Security).

Esta jerarquía operativa impone un ecosistema de restricciones administrativas, físicas y logísticas que introducen una variabilidad en el flujo de trabajo. A continuación, se describen los principales retos y condicionantes que exigieron la implementación de un sistema de control dinámico.

Restricciones Administrativas y Habilitación de Recursos En la teoría de flujos, un recurso no puede entrar al sistema si no está "preparado" (Make-Ready). En el entorno aeroportuario, esta preparación representó uno de los mayores cuellos de botella administrativos:

Filtros de Ingreso y Credencialización: Todo el personal debió aprobar dos inducciones obligatorias (Seguridad Aeroportuaria y Operaciones). El reto logístico radicaba en que estas capacitaciones tenían cupos limitados, exigían un preaviso de tres días y solo se dictaban tres veces por semana. Esta restricción impedía la contratación reactiva o el ingreso de personal "Justo a Tiempo" (JIT) ante imprevistos, obligando a gestionar el recurso humano con semanas de antelación. Adicionalmente, las credenciales (stickers) requerían renovación mensual, generando un ciclo administrativo constante para evitar la desmovilización forzada de las cuadrillas.

Liberación de Frentes (NOTAM): La planificación estratégica del cerramiento (realizada 15 días antes del inicio) requería la emisión de un NOTAM (Notice to Air Missions). Un NOTAM es un aviso que contiene información esencial sobre el establecimiento, condición o modificación de cualquier instalación, servicio o procedimiento aeronáutico, cuyo conocimiento oportuno es vital para el personal de operaciones de vuelo (Federal Aviation Administration [FAA], 2022). Este trámite exigía una ventana de gestión mínima de 10 días ante la Aeronáutica Civil para socializar el cierre de la calle de rodaje Alfa con los explotadores aéreos, convirtiéndose en el "Hito Cero" de la ruta crítica.

Restricciones Físicas y Prevención de Riesgos en Plataforma La convivencia entre maquinaria pesada y aeronaves comerciales exigió protocolos de aislamiento y limpieza (orden y aseo) con tolerancias nulas:

Cerramientos y Balizamiento: Los frentes de trabajo debieron encapsularse mediante maletines plásticos tipo New Jersey (distanciados máximo a 3 metros y lastrados con agua) y balizas rojas

de luz fija. Toda la maquinaria debió equiparse con banderas de señalización e iluminación tipo licuadora.

Gestión de FOD (Foreign Object Debris): Cualquier residuo constructivo en la plataforma representa un riesgo catastrófico por ingestión en los motores de las aeronaves. Esto obligó a mantener cuadrillas de barrido permanente. Asimismo, se prohibió el uso de elementos generadores de fuego y se exigió que toda estructura temporal (como las carpas de curado) contara con anclajes y guayas de seguridad reforzados para evitar su desprendimiento por las ráfagas de los motores (Jet Blast).

Variabilidad Logística y Dependencia de Terceros El mayor desafío para la estabilidad de la producción fue la dependencia de agentes externos para la movilidad dentro de la Zona Aire, generando constantes "desperdicios por espera":

El Cuello de Botella del Escolta Operativo: Todo movimiento de personal, suministros o maquinaria pesada desde el campamento hasta el frente de obra requería la escolta obligatoria de un vehículo de operaciones de Aerocali, comunicado por radio con la Torre de Control a través del indicativo "Sierra Mike". Dado que el supervisor de plataforma debía atender múltiples incidencias propias del aeropuerto, los tiempos de espera para ingresar materiales (como camiones de concreto) eran variables e impredecibles, alterando los rendimientos diarios de la obra.

Autoridad de Detención Inmediata, el flujo de trabajo estaba sujeto a detenciones inmediatas sin previo aviso por instrucciones directas del Control de Tránsito Aéreo (ATC), ya fuera por emergencias, desvíos de aeronaves o condiciones climáticas severas, obligando a detener maquinaria e inmovilizar cuadrillas en cuestión de segundos.

Desalineación de Horarios de Soporte, Debido a las restricciones térmicas del concreto MR 50, las fundiciones se programaron en horarios de madrugada (4:00 AM). Sin embargo, durante estos turnos nocturnos, la estructura administrativa y de soporte técnico del concesionario operaba a capacidad mínima, lo que dificultaba enormemente la resolución inmediata de contingencias o la gestión rápida de permisos de acceso adicionales, dejando al equipo de obra operativamente aislado.

2.3. Principios De Lean Construction

La metodología tradicional de planificación en la construcción se fundamenta casi exclusivamente en el Método de la Ruta Crítica (CPM) y en la representación mediante

diagramas de Gantt. Este enfoque opera bajo un paradigma centralizado de 'comando y control'. Según Koskela (1992), se basa en el modelo de conversión, el cual asume erróneamente que la transformación de entradas en salidas es la única actividad que agrega valor. Esta limitación del modelo de conversión fue posteriormente formalizada en la teoría de producción de Koskela (2000).

En este modelo determinista (push system), los niveles directivos definen 'lo que debe hacerse' sin evaluar la capacidad real de ejecución en campo ni gestionar las restricciones operativas (Ballard & Howell, 1998). La desconexión entre lo planificado y la capacidad real genera una variabilidad alta, dado que los planes maestros estáticos no logran absorber la naturaleza estocástica de los proyectos de infraestructura.

Como respuesta a estas deficiencias, surge la filosofía Lean Construction. Sus raíces se remontan al sistema de "producción sin pérdidas" desarrollado por Toyota en la década de 1950, cuyo objetivo central era la maximización del valor entregado al cliente mediante la eliminación sistemática de los desperdicios (procesos que consumen recursos sin agregar valor). En 1992, Lauri Koskela adaptó esta filosofía a la industria de la construcción, proponiendo el modelo TFV (Transformación, Flujo y Valor) (Koskela et al., 2002). Este nuevo paradigma demostró que para reducir la variabilidad y los sobrecostos en los proyectos, la construcción no debía gestionarse únicamente como una secuencia de conversiones, sino como un flujo de trabajo continuo, donde la reducción de tiempos muertos y reprocesos es tan importante como la ejecución misma (Koskela, 1992).

2.4. Fundamentos Del Last Planner System (LPS)

Como resultado de la evolución teórica de la filosofía Lean, Glenn Ballard y Greg Howell desarrollaron el Last Planner System (LPS), un sistema de control de producción orientado a aumentar la confiabilidad de la planificación mediante la gestión de flujos de trabajo intermedios y la creación de compromisos colaborativos. A diferencia del modelo tradicional de empuje, el LPS propone un cambio de paradigma: migrar de una planificación reactiva ('lo que debe hacerse') hacia un análisis proactivo fundamentado en la liberación anticipada de restricciones ('lo que puede hacerse').

Esta lógica exige integrar de manera sistémica cinco factores antes del inicio de cada tarea: la asignación formal de responsables, la disponibilidad de espacios físicos, el suministro de recursos, la finalización de las actividades predecesoras y el flujo de información técnica.

Estos factores corresponden a las precondiciones de ejecutabilidad formuladas por Koskela (1999).

Al garantizar la convergencia de estos factores, el LPS mitiga la variabilidad operativa y estabiliza el flujo de producción (Ballard, 2000). Las formulaciones más recientes del sistema han consolidado estos principios como un estándar de control de producción (Ballard & Tommelein, 2020). La implementación operativa del LPS se estructura en tres niveles de planificación jerárquicos y vinculados. El primer nivel, denominado cronograma maestro, proporciona una visión macroscópica de la secuencia lógica y los hitos fundamentales del proyecto. A diferencia de la programación convencional, en este nivel se prioriza la sectorización del proyecto en frentes de trabajo definidos, permitiendo una visualización rítmica de las actividades a través del tiempo. Esta división técnica facilita la replicación de secuencias operativas y la estimación precisa de duraciones por frente, lo que resulta en una línea base detallada que sirve como marco de referencia para las fases subsiguientes de planificación intermedia y semanal.

La formulación del cronograma maestro se fundamenta en un proceso de planificación inversa o Pull Session. En esta sesión participan los últimos planificadores: maestros de obra, residentes y subcontratistas responsables de la ejecución directa. La dinámica colaborativa permite calibrar los rendimientos y tiempos de ejecución reales, lo que reduce la incertidumbre inherente a las estimaciones teóricas. A través del consenso y la negociación de hitos, se establecen acuerdos formales para la entrega de frentes entre las distintas especialidades. Este enfoque no solo optimiza la secuencia lógica, sino que también fortalece el compromiso de los actores involucrados, quienes internalizan el impacto de sus actividades en la ruta crítica y en el plazo de entrega final del proyecto.

Una vez consolidado el cronograma maestro mediante la Pull Session, se procede a estructurar las Planificaciones Intermedias (Lookahead Planning). Este nivel de planificación actúa como un filtro de viabilidad que proyecta las actividades a ejecutarse en un horizonte temporal específico, denominado ventana de observación. En proyectos de alta complejidad se recomienda un horizonte de seis semanas; en intervenciones de corta duración y ritmo acelerado, como la rehabilitación de pavimentos, se opta por una ventana de dos semanas. La función del lookahead como filtro de viabilidad ha sido optimizada en la literatura reciente para maximizar el flujo de trabajo (Hamzeh et al., 2012)

El objetivo principal de esta etapa es el Análisis de Restricciones, un proceso proactivo orientado a identificar y remover obstáculos (logísticos, técnicos o administrativos) antes de que las tareas entren en la programación semanal. De este modo, la planificación intermedia garantiza la continuidad del flujo de trabajo y protege la producción contra la variabilidad externa.

Este nivel de planificación facilita la designación formal de responsables para la remoción de cada restricción, estableciendo fechas de compromiso que permiten un seguimiento riguroso y sistemático. La revisión de este proceso se realiza con una periodicidad semanal, incrementando el volumen de actividades bajo análisis de forma dinámica conforme avanza la ejecución del proyecto. El propósito medular es garantizar que toda tarea sea liberada de obstáculos administrativos, técnicos o logísticos antes de su ingreso en la programación semanal. Al asegurar que solo el 'trabajo listo' sea asignado, se protege la estabilidad del flujo de producción, se eliminan los tiempos de inactividad y se mitiga el riesgo de desviaciones en el cronograma maestro.

La tercera escala del sistema es la Planificación Semanal, la cual operacionaliza los compromisos adquiridos para el periodo inmediato. Este nivel se gestiona mediante reuniones diarias de coordinación, típicamente de 15 minutos en el sitio de obra, diseñadas para supervisar de forma visual y táctica la ejecución de las tareas. La potencia del LPS en esta fase radica en la medición sistemática de dos indicadores fundamentales: el Porcentaje de Plan Completado (PPC) y las Causas de No Cumplimiento (CNC). Estas métricas trascienden el simple control de avance, ya que funcionan como un dispositivo de mejora continua que permite identificar y mitigar las variabilidades no previstas, garantizando la estabilidad del flujo de trabajo y el aprendizaje organizacional ante las desviaciones detectadas.

El registro y monitoreo semanal de estos indicadores permite modelar el comportamiento del sistema de producción a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Mientras que el PPC revela la confiabilidad de la planificación y la estabilidad del flujo, el análisis de frecuencias de las CNC actúa como un diagnóstico de las patologías recurrentes en la ejecución. Para robustecer este control, se integra la metodología del Valor Ganado (EVM), la cual permite correlacionar la eficiencia del flujo de trabajo (Lean) con el desempeño del cronograma (SPI) y el costo (CPI). Esta dualidad métrica es crítica en entornos aeroportuarios, donde la variabilidad del flujo no solo impacta la productividad, sino que pone en riesgo el cumplimiento de hitos contractuales y la rentabilidad del proyecto.

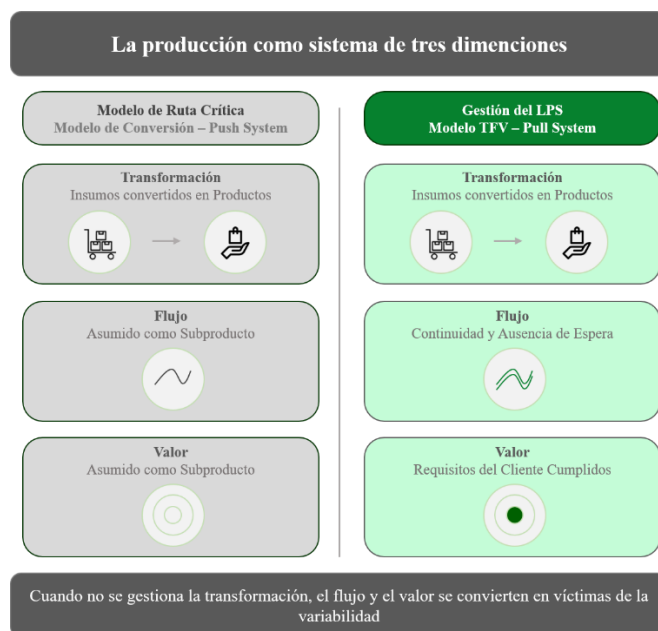


Figura 5. Esquema comparativo de metodologías de gestión de proyectos.

Nota: Fuente – Elaboración Propia.

2.5. Gestión Del Valor Ganado

La Gestión del Valor Ganado (EVM) es una metodología objetiva y sistémica para la medición del desempeño de proyectos que integra de manera simultánea el alcance, el cronograma y los recursos consumidos (Project Management Institute [PMI], 2021). A diferencia de los métodos de control tradicionales que se limitan a comparar el gasto real frente al presupuesto, el EVM introduce el concepto de "trabajo ejecutado" (Anbari, 2003), permitiendo determinar si el valor generado en la obra corresponde efectivamente a la inversión realizada y al tiempo transcurrido. En el contexto de esta investigación, el EVM se fundamenta en tres dimensiones métricas esenciales que permiten diagnosticar la salud del sistema de producción.

Sigla	Nombre	Fórmula	Interpretación	Valor de referencia
PV	Planned Value · Valor planificado	Suma del costo presupuestado del trabajo programado hasta la fecha de corte	Cuánto trabajo se debería haber ejecutado, valorado en unidades monetarias, según la línea base	Línea base. Sin umbral propio; sirve como referente de los demás indicadores
EV	Earned Value · Valor ganado	Suma del costo presupuestado del trabajo efectivamente ejecutado hasta la fecha de corte	Cuánto trabajo se ha ejecutado realmente, valorado al costo presupuestado original	Cuanto más cercano o superior a PV, mejor desempeño

Sigla	Nombre	Fórmula	Interpretación	Valor de referencia
AC	Actual Cost · Costo real	Suma de los costos efectivamente incurridos para ejecutar el trabajo realizado hasta la fecha de corte	Cuánto se ha gastado realmente para ejecutar el trabajo realizado	Cuanto más cercano o inferior a EV, mejor desempeño
BAC	Budget at Completion · Presupuesto total	$BAC = \sum PV$	Costo total presupuestado del proyecto en la línea base	Referente fijo durante todo el proyecto. No varía salvo por cambio formal de alcance
SV	Schedule Variance · Variación de cronograma	$SV = EV - PV$	Desviación del proyecto respecto al cronograma planificado, expresada en unidades monetarias	$SV > 0$: adelantado · $SV = 0$: en cronograma · $SV < 0$: retrasado
CV	Cost Variance · Variación de costo	$CV = EV - AC$	Desviación del proyecto respecto al presupuesto planificado, expresada en unidades monetarias	$CV > 0$: bajo presupuesto · $CV = 0$: en presupuesto · $CV < 0$: sobrecosto
SPI	Schedule Performance Index · Índice de desempeño del cronograma	$SPI = EV / PV$	Eficiencia con la que se está ejecutando el cronograma. Adimensional	$SPI \geq 1$: en o por encima de meta · $SPI < 1$: retrasado (tolerancia gerencial 0.95–1.05)
CPI	Cost Performance Index · Índice de desempeño del costo	$CPI = EV / AC$	Eficiencia con la que se está ejecutando el presupuesto. Adimensional	$CPI \geq 1$: en o por encima de meta · $CPI < 1$: sobrecosto (tolerancia gerencial 0.95–1.05)
EAC	Estimate at Completion · Estimación al cierre	$EAC = BAC / CPI$ (método paramétrico, asumiendo que la tendencia continúa)	Proyección del costo total esperado al cierre del proyecto, dada la eficiencia actual	$EAC \leq BAC$: el proyecto cerrará dentro de presupuesto · $EAC > BAC$: sobrecosto proyectado

Tabla 1. Resumen de indicadores de la metodología de gestión EVM.

Nota: Fuente – Elaboración propia

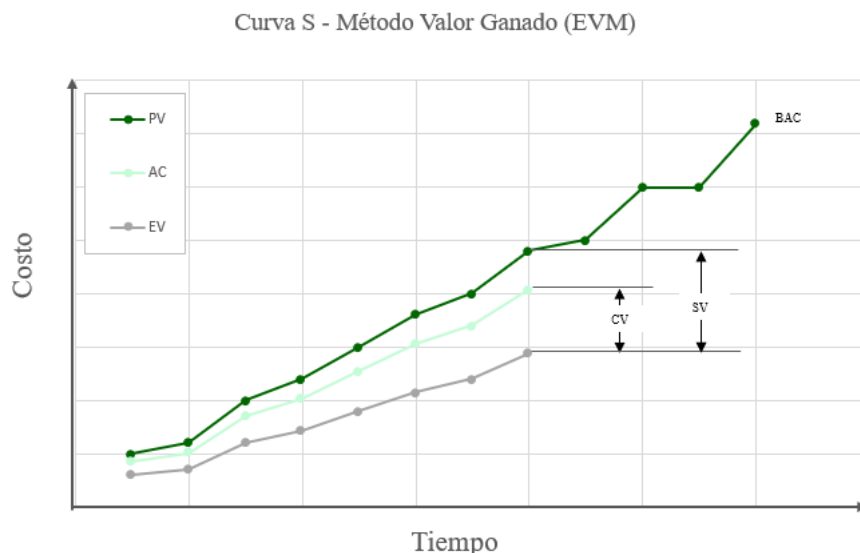


Figura 6. Gráfico de Curva S – Teoría del Valor Ganado

Nota: Fuente – Elaboración Propia con base en información del PMI

2.6. Sinergia Entre Lean Construction y EVM

La articulación conceptual entre el EVM y el LPS ha sido analizada por Kim y Ballard (2010), quienes contrastan la lógica de control de ambos sistemas. Desde una perspectiva sistémica, el EVM actúa como el indicador "rezagado" (lagging indicator) que confirma el éxito de los indicadores "líderes" (leading indicators) del Last Planner System. Mientras que el PPC (Porcentaje de Plan Completado) mide la fiabilidad del flujo diario en campo, el EVM traduce esa fiabilidad en rentabilidad y cumplimiento de hitos contractuales. La relación entre la confiabilidad de la planificación (PPC) y el desempeño del proyecto ha sido establecida empíricamente por González et al. (2007).

Esta integración permite demostrar que una producción estable y protegida contra la variabilidad es, por definición, una producción financieramente sostenible. Esta relación entre control de producción y mejora de la productividad ha sido documentada empíricamente (Liu & Ballard, 2008).

3. Metodología

3.1. Tipo y Enfoque De Investigación

La presente investigación se enmarca en la modalidad de investigación empírica aplicada, estructurada bajo el diseño metodológico de un estudio de caso único (Yin, 2018). Lejos de pretender formular un nuevo modelo de gestión, el objetivo consiste en documentar

la aplicación y evaluar la viabilidad operativa del Last Planner System (LPS) en la rehabilitación de pavimentos rígidos del Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón; un entorno caracterizado por restricciones logísticas y operativas exigentes.

Para cumplir con este propósito, el estudio adopta un enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo). Desde la dimensión cuantitativa, se estructura un análisis comparativo longitudinal (Gap Analysis) que contrasta el comportamiento del sistema de producción bajo una línea base de gestión tradicional (Etapa 1), frente a una fase de intervención donde se aplicaron los principios de la filosofía Lean (Etapa 2). Esta medición se sustenta en el cruce de indicadores paramétricos de flujo, como el Porcentaje de Plan Completado (PPC), y métricas de desempeño del Valor Ganado (EVM), específicamente el SPI y el CPI.

Complementariamente, desde la dimensión cualitativa, la investigación integra la recolección y categorización sistemática de las CNC. A través de esta triangulación de datos, que articula la fiabilidad operativa (PPC), el diagnóstico cualitativo de fallos (CNC) y el desempeño financiero-temporal (EVM), el estudio busca generar evidencia documental rigurosa. El objetivo final es determinar cómo la liberación anticipada de restricciones estabiliza el sistema de producción y cómo dicha estabilidad impacta directamente en la rentabilidad del proyecto y el cumplimiento de los hitos contractuales.

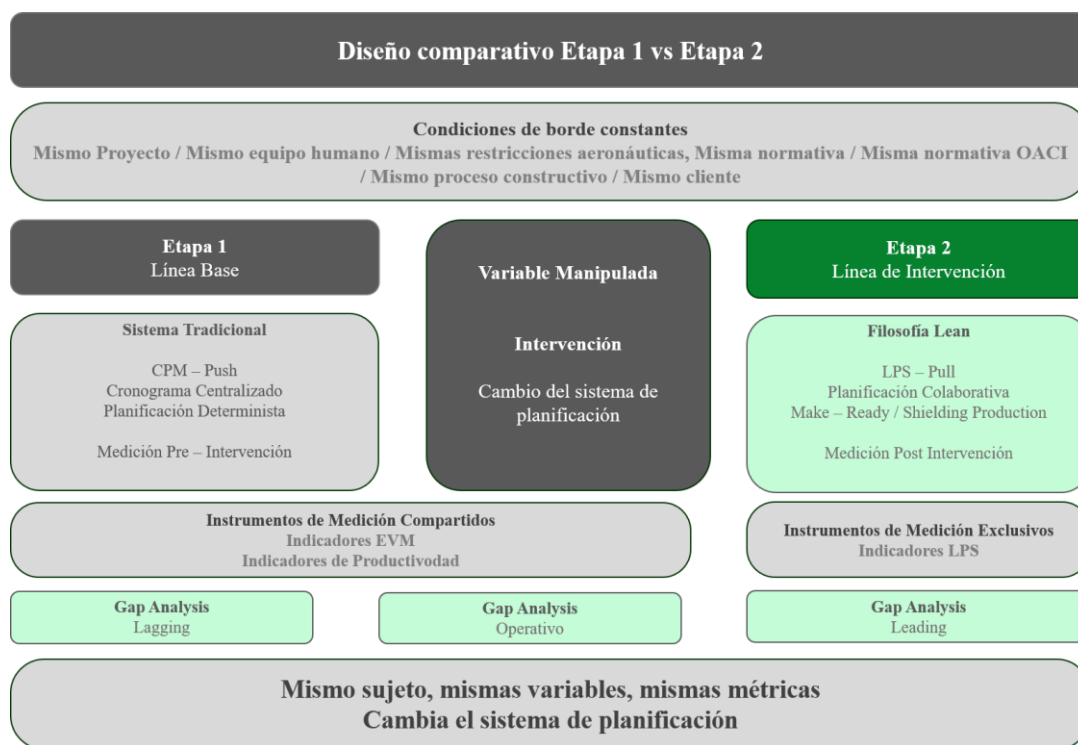


Figura 7. Esquema de diseño comparativo entre las etapas 1 y 2 del proyecto.

Nota: Fuente – Elaboración propia.

3.2. Descripción Del Caso De Estudio

El proyecto de rehabilitación de pavimentos rígidos en la calle de rodaje Alfa constituye el escenario empírico de esta investigación. Dada su ubicación estratégica en un área de movimiento activo, la intervención estuvo supeditada a un ecosistema logístico exigente, caracterizado por ventanas de trabajo intermitentes, protocolos inquebrantables de seguridad operacional (Safety) y una dependencia determinante de factores exógenos, tales como la asignación de escoltas de plataforma y las autorizaciones del Control de Tránsito Aéreo (ATC).

Para estructurar el análisis documental del caso de estudio, el ciclo de vida del proyecto se dividió en dos etapas operativas. Este fraccionamiento permite establecer una comparación de desempeño bajo condiciones de borde y restricciones operativas idénticas. Este diseño corresponde a un esquema cuasi-experimental de medidas repetidas (Campbell & Stanley, 1963)

3.2.1. Etapa 1 (Línea Base y Gestión Tradicional)

Representa el periodo de ejecución operado bajo el paradigma de planificación determinista (enfoque de empuje o Push system). Esta fase se instrumentaliza como la línea base del estudio, permitiendo cuantificar el desempeño inicial mediante indicadores de rendimiento. Su diagnóstico documenta las ineficiencias, la degradación del cronograma y la variabilidad intrínseca de un modelo de conversión centralizado cuando se enfrenta a las perturbaciones impredecibles del entorno aeroportuario.

3.2.2. Etapa 2 (Fase De Implementación Lean)

Constituye el periodo de ejecución donde se rediseñó el sistema de gestión de obra mediante la aplicación táctica del Last Planner System (LPS). Al estar sometida a las mismas presiones logísticas que la etapa predecesora, esta fase permite aislar y evaluar empíricamente la capacidad del LPS para funcionar como un escudo productivo (*Shielding Production*). Su análisis busca documentar cómo la planificación colaborativa y la liberación proactiva de restricciones logran estabilizar los flujos de trabajo y mejorar la confiabilidad del sistema de producción. El control de las condiciones de borde permite mitigar las principales amenazas a la validez interna del diseño (Shadish et al., 2002)

En ambas etapas operativas se evaluó el comportamiento de los costos y el cumplimiento del cronograma maestro mediante la metodología de Gestión del Valor Ganado

(EVM). Esta integración métrica permitió correlacionar la fiabilidad operativa del flujo, monitoreada a través del LPS, con la salud financiera del proyecto.

Para ello se utilizaron los indicadores Índice de Desempeño del Costo (CPI) e Índice de Desempeño del Cronograma (SPI). La aplicación de este marco en el estado inicial y en la fase de intervención permite validar la viabilidad económica del sistema y cuantificar el impacto de la estabilidad del flujo sobre la rentabilidad y la eficiencia en el uso de los recursos.

3.3. Protocolo De Recolección De Información

Para garantizar la comparabilidad técnica y objetiva entre ambas etapas operativas, el protocolo de recolección de datos se estructuró bajo métricas de evaluación transversales. Dado que la Etapa 1 se ejecutó bajo un paradigma de gestión tradicional (Push), la homologación del análisis para ambos periodos se centró en tres dimensiones macro de la ingeniería de proyectos: la dimensión de productividad (rendimientos físicos reales en sitio), el cumplimiento del cronograma (desviaciones temporales frente a la línea base) y la eficiencia del Valor Ganado (indicadores EVM: SPI y CPI).

Esta estandarización paramétrica es fundamental para establecer una línea base equitativa. Al evaluar a ambos sistemas bajo las mismas reglas de costo, tiempo y rendimiento, es posible aislar y demostrar objetivamente cómo la introducción posterior de las herramientas de control Lean en la Etapa 2 (tales como la medición de confiabilidad del PPC y el diagnóstico de las CNC) logran impactar y mejorar la eficiencia global del proyecto aeroportuario.

3.3.1. Fuentes De Datos Estructurales (Línea Base Normativa)

Comprende el cronograma de actividades original (línea base consolidada en el proceso de licitación), las proyecciones de inversión y las expectativas de alcance. Estos documentos configuran el marco de referencia determinista del proyecto, aportando los datos fundamentales para establecer el Valor Planificado (PV, Planned Value) y el Presupuesto Hasta la Conclusión (BAC, Budget at Completion) requeridos por la metodología EVM.

3.3.2. Fuentes De Datos Operativos (Trazabilidad De La Etapa 1)

Agrupar la documentación detallada de la ejecución real en campo, incluyendo bitácoras de obra, reportes de avances diarios de producción y control de costos contable. Esta evidencia empírica constituye la base para calcular el avance físico real (EV) y los costos incurridos (AC). El cruce de estos datos permite cuantificar el impacto de las perturbaciones del entorno sobre

el rendimiento del sistema de planificación tradicional. Esto establece una línea base objetiva para identificar oportunidades de optimización.

El propósito de este levantamiento de información es consolidar una métrica cuantitativa exacta del estado inicial del proyecto. Dicha línea base actuará como el punto de contraste frente a los resultados empíricos que arrojará la Etapa 2 (fase de intervención Lean). De esta forma, el diseño metodológico asegura una evaluación objetiva y basada en datos sobre la mitigación de la variabilidad y la mejora en la predicción del cronograma.

3.4. Evaluación Del Desempeño Mediante Valor Ganado (EVM)

Para fortalecer la evaluación cuantitativa de la investigación, se integrará la metodología de la Gestión del Valor Ganado (EVM, Earned Value Management) como el mecanismo para interrelacionar el desempeño operativo en campo con las variables macroeconómicas de alcance, costo y tiempo. El análisis de estas dimensiones resulta esencial para establecer un diagnóstico sistémico que trascienda la métrica convencional de productividad física, permitiendo una interpretación integral del éxito del proyecto desde la gerencia de construcción.

La implementación del marco del EVM durante el estudio se orienta a cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Establecer la Línea Base de Desempeño que permitirá cuantificar con precisión matemática la desviación entre la planificación inicial y la ejecución real documentada durante la Etapa 1. Este análisis define el punto de partida para identificar ineficiencias en el uso de los recursos.
- Determinación de Índices de Eficiencia (SPI y CPI) que se utilizarán el Índice de Desempeño del Cronograma (SPI) y el Índice de Desempeño del Costo (CPI) como variables de control. Estos indicadores operan como indicadores de la gestión tradicional, evidenciando cómo las interrupciones aeroportuarias afectan la salud financiera del contrato
- . Validación de la Viabilidad y Beneficio Incremental: el contraste de los resultados de la Etapa 1 frente a la Etapa 2 permitirá determinar, con base en la evidencia, si la estabilidad del flujo lograda mediante Lean Construction se traduce en un aumento de la eficiencia financiera. Asimismo, permitirá evaluar la protección de los plazos contractuales ante la entidad contratante.

Este enfoque multidimensional garantiza que la viabilidad de la aplicación del Last Planner System no sea evaluada exclusivamente por el cumplimiento de actividades semanales (PPC), sino por su capacidad para proteger la rentabilidad y el cumplimiento global de la obra en un entorno de complejidad exigente.

3.5. Indicadores De Desempeño y Herramientas de Procesamiento

Para evaluar la viabilidad de la implementación del Last Planner System (LPS), se definió un conjunto de indicadores de desempeño cuantitativos que permiten medir la eficacia del sistema frente a las prácticas convencionales. La selección de estas métricas se realizó mediante un proceso de validación técnica en conjunto con la gerencia de la empresa contratista y la dirección de tesis, asegurando su relevancia tanto para el rigor académico como para el control de gestión corporativo.

Los datos se procesarán mediante métodos estadísticos descriptivos, alimentados por la observación directa en campo. El marco de evaluación se fundamenta en las siguientes categorías.

3.5.1. Indicadores De Confiabilidad Del Plan (LPS)

Estas métricas permiten cuantificar la estabilidad del flujo de trabajo y la reducción de la incertidumbre operativa en el corto plazo:

- Porcentaje de Plan Completado (PPC): Refleja la fiabilidad de los compromisos semanales.
- Causas de No Cumplimiento (CNC): Categorización cualitativa que permite identificar los factores raíz de la variabilidad.

3.5.2. Indicadores De Desempeño Del Proyecto (EVM)

Estas variables paramétricas facilitaron evaluar de forma integral el impacto de la gestión Lean en la eficiencia económica y la puntualidad a escala macro. La integración de este conjunto de métricas no solo diagnosticará la salud actual de la obra, sino que proporcionará un modelo predictivo para anticipar el comportamiento financiero del contrato. Se estructuran en tres dimensiones de análisis:

- Variación del Cronograma (SV - Schedule Variance): Cuantifica el volumen de trabajo físico realmente ejecutado frente al volumen que se había programado para una fecha de corte. Un valor positivo indica un adelanto en el cronograma.

- Fórmula: $SV = EV - PV$
- Variación del Costo (CV - Cost Variance): Mide la diferencia absoluta entre el valor del trabajo realizado y los costos reales incurridos para lograrlo. Un valor positivo indica un ahorro neto frente al presupuesto.
 - Fórmula: $CV = EV - AC$
- Índice de Desempeño del Cronograma (SPI): Evalúa la eficiencia del tiempo con relación a la planificación base. Valores ≥ 1.0 reflejan un ritmo de ejecución óptimo.
 - Fórmula: $SPI = EV/PV$
- Índice de Desempeño del Costo (CPI): Evalúa la eficiencia financiera de la inversión. Valores ≥ 1.0 denotan que la obra se está ejecutando dentro de los márgenes de rentabilidad esperados.
 - Fórmula: $CPI = EV/AC$
- Presupuesto Hasta la Conclusión (BAC): Representa la línea base de costo total consolidada y aprobada al inicio del contrato. Sirve como la referencia base para medir todas las desviaciones posteriores.
- Estimación a la Conclusión (EAC): Proyecta cuál será el costo total final del proyecto basándose en la eficiencia de costos actual (CPI acumulado). Esta métrica es fundamental en la investigación, ya que permite validar matemáticamente si la estabilización del flujo lograda en la Etapa 2 (LPS) consigue acercar el costo final (EAC) al presupuesto original (BAC)

3.5.3. Indicadores De Productividad y Eficiencia Operativa

Para la cuantificación objetiva de los rendimientos en sitio, el procesamiento de la información se estructuró a través de métricas focalizadas en el aprovechamiento de los recursos. La consolidación de estos datos empíricos se centralizó en una herramienta de cálculo paramétrico (ver Anexo 4: Matriz de Control y Seguimiento), la cual permitió obtener los siguientes Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) operativos:

- Eficiencia de Avance (%): Mide la relación porcentual entre el avance físico real ejecutado y la programación establecida para cada periodo de observación. Este indicador permite identificar desviaciones tempranas frente al cronograma objetivo.
- Productividad (losas/día): Determina el rendimiento operativo diario del equipo de trabajo, cuantificado específicamente a través del número de losas rehabilitadas por jornada de trabajo efectiva.

- Consumo de Horas-Hombre (H-H/unidad): Indicador de eficiencia de la mano de obra que relaciona el total de horas invertidas por el personal operativo con cada unidad de producción lograda. Su objetivo es evaluar el aprovechamiento del recurso humano bajo la metodología Lean.
- Consumo de Horas-Máquina (H-M/unidad): Mide la intensidad y aprovechamiento del parque de maquinaria, correlacionando las horas de operación de los equipos con el volumen de obra ejecutado. Este KPI permite identificar tiempos muertos de maquinaria derivados de interrupciones o restricciones logísticas.

La combinación de estas métricas operativas de productividad con los indicadores macro financieros (EVM) permite una triangulación de datos que asegura una evaluación integral. Este enfoque minimiza posibles sesgos en la medición y fortalece la validez científica de las conclusiones sobre el beneficio incremental de la filosofía Lean.

Con base en la información recolectada y consolidada, se procedió al cálculo y procesamiento analítico de los indicadores de desempeño correspondientes a la Etapa 1 del proyecto. Esta fase de análisis tiene como propósito fundamental la construcción de la línea base, la cual permite cuantificar de manera empírica y objetiva los niveles de productividad, la variabilidad del entorno y la eficiencia financiera predominantes bajo el modelo de gestión tradicional.

El alcance de este procesamiento de datos incluyó:

- La tabulación paramétrica de los rendimientos físicos de obra (ejecución real vs. programada).
- El análisis de las desviaciones de costos y cronograma mediante el método de Valor Ganado, calculando los índices históricos de SPI y CPI.
- El diagnóstico retrospectivo de las restricciones y causas raíz que generaron interrupciones o retrasos durante esta primera fase operativa.

Este análisis actuó como el patrón de referencia necesario para evaluar. Para ello, se utiliza un análisis de brechas (Gap Analysis), la viabilidad y el beneficio incremental de la implementación del Last Planner System en la Etapa 2. El resultado final de esta evaluación permitió validar estadísticamente las oportunidades de optimización del sistema actual y justificaró, con rigor técnico, la pertinencia de la transición hacia una metodología de producción fundamentada en la filosofía Lean.

3.6. Plan De Aplicación Del LPS

3.6.1. Fase De Preparación: Alistamiento Para La Sesión Pull (Pull Planning)

Como paso previo a la ejecución de la Planificación Inversa (Pull Planning Session), se estructuró un protocolo de verificación de requisitos para garantizar la efectividad de la sesión colaborativa. Este proceso de alistamiento preliminar se gestionó mediante una lista de verificación técnica (Checklist de madurez de información), la cual operará como un filtro de calidad inicial. Su objetivo principal es asegurar que toda la información determinante del proyecto esté consolidada y validada antes de convocar a la mesa a los últimos planificadores (maestros de obra, contratistas y supervisores).

La liberación de esta matriz de requisitos exige la comprobación de insumos innegociables para el entorno aeroportuario, tales como: los planos de diseño topográfico y estructural definitivos de la calle de rodaje, los inventarios de disponibilidad de maquinaria pesada, la vigencia de los permisos de seguridad operacional (ingresos y escoltas), y la confirmación de los hitos contractuales.

El cumplimiento estricto de este protocolo permite mitigar la variabilidad de entrada. De este modo, se garantizó que la reunión de los contratistas se centre exclusivamente en la negociación de la secuencia lógica, la detección de interferencias espaciales y el compromiso de entrega de frentes de trabajo, eliminando de raíz el "desperdicio por espera" y las interrupciones derivadas de vacíos técnicos o administrativos.

3.6.2. Ejecución De La Planificación Inversa (Pull Session) Con Los Últimos Planificadores

La aplicación operativa del LPS inició formalmente con la ejecución de la sesión de Planificación Inversa (Pull Planning), la cual convocó a los actores directos de la producción, conocidos metodológicamente como los "últimos planificadores" (residentes de obra, maestros y subcontratistas especializados responsables de la rehabilitación). El proceso comenzará con la socialización de los objetivos estratégicos y la fecha de entrega contractual, asegurando que todos los involucrados comprendieran la importancia de mantener la estabilidad del flujo de trabajo dentro de la rigidez de un entorno aeroportuario activo.

Durante la sesión colaborativa, se aplicará la metodología de planificación en retroceso (Reverse Phase Scheduling). Partiendo del plazo contractual innegociable, los equipos de trabajo definieron "hacia atrás" la secuencia lógica de las actividades precedentes y las

condiciones de traspaso (handoffs) entre cuadrillas. Esta dinámica interactiva permitió recolectar datos empíricos sobre rendimientos reales, capacidades de los equipos y dependencias espaciales, facilitando la identificación temprana de cuellos de botella antes de iniciar la movilización en campo.

Como resultado de este consenso técnico, se consolidó el Cronograma Maestro del proyecto. Dado que las exigencias contractuales originales únicamente dictaminan el plazo máximo de ejecución, la Planificación Inversa operó como el mecanismo principal para diseñar la propuesta formal de programación. A diferencia de la Etapa 1, esta línea base para la Etapa 2 no se fundamentó en estimaciones teóricas de oficina, sino en una red de compromisos directos y factibles establecidos por los propios ejecutores, incrementando de manera significativa la confiabilidad y el nivel de apropiación del plan de trabajo general.

3.6.3. Consolidación y Estructuración Del Cronograma Maestro

A partir de la red de compromisos y la información técnica obtenida durante la Pull Session, se procedió a la estructuración definitiva del Cronograma Maestro. Este documento actuó como el eje central de la Etapa 2, integrando de manera sistemática el plazo contractual de la rehabilitación aeroportuaria con la secuencia lógica de actividades para cada frente de trabajo en la calle de rodaje Alfa.

A diferencia de los métodos tradicionales de Push, este cronograma incorpora una lógica de control dinámico. En él se registraron no solo las duraciones de las tareas, sino las interdependencias y los traspasos espaciales que fueron validados empíricamente por los propios ejecutores. Este instrumento permitió realizar un seguimiento visual del avance físico mediante cortes periódicos, facilitando la detección temprana de desviaciones y asegurando que la programación semanal se mantuviera alineada con los objetivos del proyecto.

3.6.4. Identificación De Restricciones y Generación De Trabajo Realizable

De forma paralela a la estructuración temporal, la sesión colaborativa conllevó a un proceso sistemático de identificación de restricciones para cada paquete de trabajo. Bajo el principio Lean de "asegurar que el trabajo sea realizable" (Make-Ready Process), se documentó detalladamente todos los factores limitantes técnicos, administrativos, logísticos o de seguridad operacional que pudiesen impedir el inicio o la continuidad de las tareas.

Estas restricciones comprenden requisitos determinantes en el entorno aeroportuario, tales como el suministro oportuno de materiales, la validación de frentes por topografía, la

asignación de vehículos escolta y la liberación de permisos especiales por parte de la concesión. Al mapear estas variables de manera anticipada, la metodología permitió establecer una matriz de liberación de obstáculos, asignando responsables directos y fechas límite de resolución.

Este enfoque preventivo operó como un escudo de producción: aseguró la generación de asignaciones de trabajo seguras (Sound Assignments) y garantizó que el equipo de obra únicamente se comprometa a ejecutar aquellas actividades que tienen un flujo continuo garantizado y el 100% de sus restricciones removidas.

3.6.5. Operatividad Del Modelo: Gobernanza y Asignación De Roles Estratégicos

Una vez consolidada la matriz de restricciones y definidos los indicadores de desempeño, se procedió a estructurar la gobernanza del equipo de administración de obra. Este paso resultará fundamental para materializar el modelo de control en el entorno físico del proyecto, asegurando que cada restricción identificada cuente con un responsable directo y un plazo límite de liberación estrictamente alineado con las ventanas de ejecución aeroportuaria.

Para evitar la centralización excesiva y garantizar la agilidad de respuesta, la estructura de responsabilidades se divide en dos ejes operativos complementarios:

- Eje de Desbloqueo Logístico (Gestión de Liberación): Conformado por los perfiles encargados de ejecutar y proteger el flujo de trabajo. Su función primordial consistirá en remover proactivamente los obstáculos administrativos y operativos (tales como la gestión de ingresos, la coordinación de vehículos escolta con el supervisor de plataforma y las autorizaciones del ATC) para operar como una protección que garantizara que el trabajo se pudiera ejecutar.
- Eje de Control Analítico (Gestión de la Información): Conformado por los perfiles responsables del seguimiento paramétrico. Su función se centrará en la captura sistemática de datos empíricos en los frentes de trabajo y el cálculo oportuno de los indicadores de control cruzado (PPC, frecuencias de CNC y las métricas de Valor Ganado: SPI/CPI).

Esta asignación formal de roles garantizó la trazabilidad absoluta del sistema de control. Al separar tácticamente la labor de "hacer el trabajo realizable" de la labor de "medir el desempeño", se asegura que la toma de decisiones gerenciales no se base en intuiciones, sino en datos reales y actualizados. Este diseño organizacional permite cerrar de manera efectiva el

ciclo de mejora continua frente a la variabilidad que se pueda experimentar durante toda la Etapa 2 del proyecto.

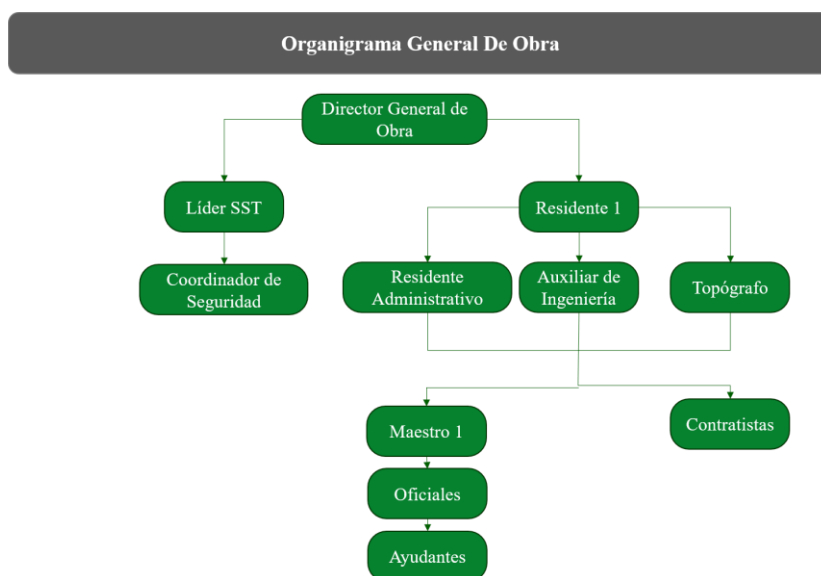


Figura 8. Organigrama general de la obra

Nota: Fuente – Elaboración Propia.

3.6.6. Definición De La Estructura de Responsabilidades y Gestión Del Control

Una vez definida la estructura de gobernanza y control, se implementó el proceso de Planificación Intermedia o Lookahead Planning, estableciendo un horizonte de análisis continuo de cuatro a seis semanas. Este proceso actuó como un mecanismo de filtrado dinámico que permitirá anticipar la variabilidad aeroportuaria y priorizar aquellas actividades que presentaban un mayor impacto estratégico para el cumplimiento del cronograma maestro.

Durante estas sesiones de análisis a mediano plazo, se realizará un seguimiento riguroso al Inventario de Trabajo Ejecutable, monitoreando semanalmente el estado de liberación de cada restricción en los diferentes frentes de intervención. Este control preventivo permitió identificar con antelación los periodos de tensión logística en los que la gestión administrativa (aprobaciones ATC, inducciones de personal o escoltas) debía intensificarse para evitar tiempos muertos en plataforma.

Al segmentar la planificación macro en ventanas de tiempo intermedias, el equipo de obra garantiza que únicamente las actividades con restricciones totalmente removidas sean transferidas a la programación semanal. Este filtro estricto optimiza el uso de la maquinaria y la mano de obra, asegurando un flujo de producción continuo y protegiendo el rendimiento económico de la Etapa 2.

3.6.7. Ejecución De La Planificación Intermedia (Lookahead Planning)

Para transitar de la visión macro del cronograma maestro a la ejecución táctica, se implementará la Planificación Intermedia mediante una ventana de observación de dos semanas (*2WLAP*). Este nivel operará como el mecanismo proactivo del sistema, cuyo objetivo fue identificar y remover anticipadamente las restricciones técnicas, administrativas y logísticas del entorno aeroportuario. Solo a través de esta validación de factibilidad, las actividades serán transferidas al inventario de trabajo ejecutable, garantizando que el flujo de producción estuviera blindado contra la variabilidad.

3.6.8. Plan De Trabajo Semanal (Weekly Work Plan)

Con el inventario de trabajo listo consolidado como único marco de referencia, se estructuró la Planificación Semanal. En este nivel de máxima granularidad operativa, el equipo de obra asumió compromisos formales respaldados exclusivamente por asignaciones viables. La gestión semanal se fundamentó en tres ejes de control:

- Selección de Tareas Comprometidas: Asignación de actividades condicionada a la disponibilidad real de los frentes de trabajo y a la capacidad productiva de las cuadrillas.
- Registro de Fiabilidad: Cálculo sistemático del Porcentaje de Plan Completado (PPC) al cierre de cada ciclo, contrastando la ejecución física real frente al compromiso adquirido en la planeación.
- Análisis de Variabilidad (CNC): Ante desviaciones en el cumplimiento, se ejecutó un diagnóstico cualitativo de causa raíz. Este registro trasciende la documentación del error, actuando como un mecanismo de retroalimentación para optimizar la liberación de restricciones en los ciclos subsiguientes.

Esta planificación se socializó con los últimos planificadores en sesiones diarias de menos de 15 minutos. Para poder generar un entorno propicio para estas reuniones, se condicionó el espacio de reunión para que la reunión fuese de pie.

Al finalizar cada semana, se realizaba una reunión donde se explicó cuál fue el PPC y cuáles fueron las CNC que se presentaron, esto con el objetivo de generar una mejora continua en el proceso.

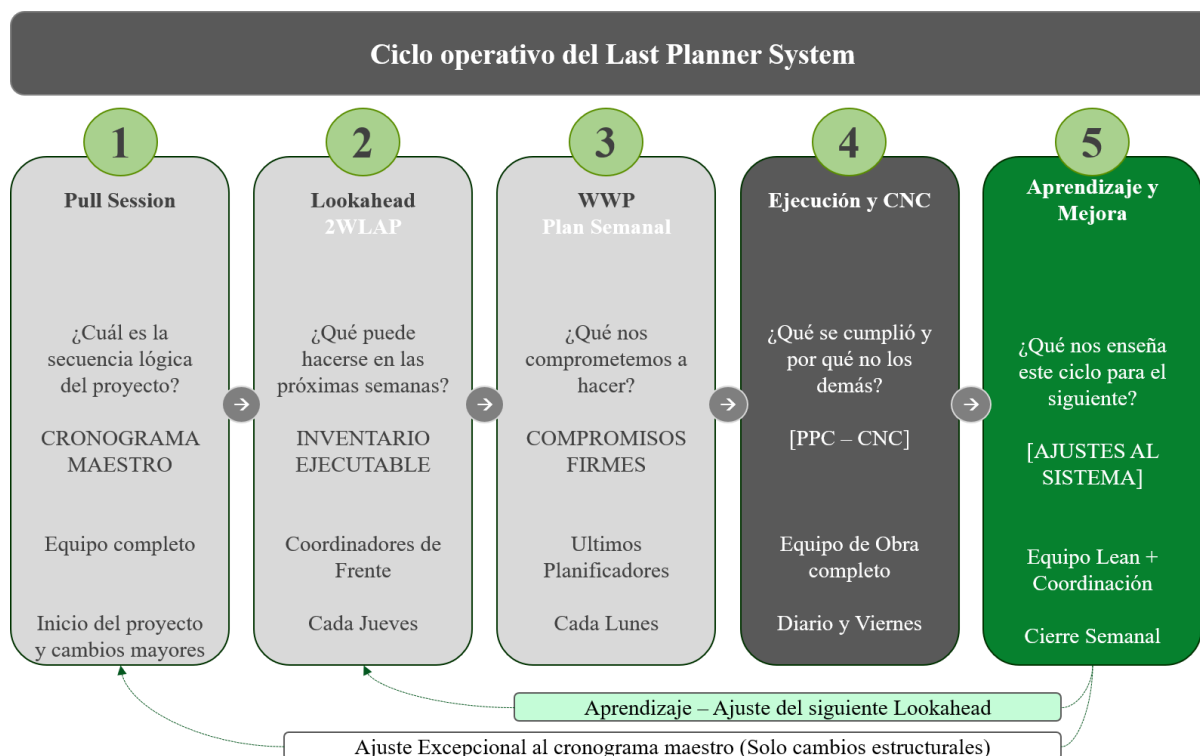


Figura 9. Esquema de ciclo Last Planner System adaptado al proyecto.

Nota: Fuente – Elaboración propia con base en los fundamentos del LPS de Koskella y Ballard.

3.6.9. Establecimiento De La Cadencia De Control y Seguimiento Operativo

Para asegurar la validez estadística y la comparabilidad entre las etapas de gestión del proyecto, se estableció un protocolo de cadencia de control basado en fechas de corte. Esta sincronización temporal es importante, ya que permite alinear paramétricamente los indicadores del flujo de producción (PPC y CNC) con las métricas de gestión financiera del método del Valor Ganado (SPI y CPI). Así, se garantiza que la evaluación empírica del sistema correlacione la estabilidad operativa con la salud financiera en intervalos de observación equivalentes.

3.6.10. Estructura Del Seguimiento Operativo y Financiero

La estrategia de monitoreo se estructuró bajo dos niveles de control interdependientes, diseñados para capturar tanto la dinámica del flujo de trabajo como el rendimiento del proyecto:

- **Reuniones Semanales de Planificación:** Sesiones colaborativas ejecutadas con los contratistas y líderes de frente (Últimos Planificadores). Este espacio constituyó el mecanismo táctico para evaluar el cumplimiento de la semana previa, gestionar la liberación de restricciones a corto plazo y calibrar el Plan de Trabajo Semanal. Su

función principal es la mitigación proactiva de la variabilidad antes de que impacte la ruta crítica.

- **Cadencia de Cortes Paramétricos (KPIs y EVM):** Establecimiento de fechas de corte estandarizadas para la recolección de datos. En estos hitos se consolida tanto la información del flujo operativo, cuantificada a través del Porcentaje de Plan Completado (PPC) y las Causas de No Cumplimiento (CNC), como la ejecución financiera mediante la Gestión del Valor Ganado (EVM).

La sincronización de estos dos niveles de control asegura una trazabilidad integral del sistema de producción. Al alinear temporalmente la medición de la fiabilidad del flujo (Lean) con el análisis de costos y cronograma (EVM), se garantiza la generación de informes de estado consistentes. Este rigor metodológico es el que permite correlacionar, con validez estadística, las mejoras en la predecibilidad de la obra con los impactos positivos en los Índices de Desempeño del Cronograma (SPI) y del Costo (CPI).

Matriz de operacionalización de indicadores

Dimensión	Indicador	Fórmula	Fuente de datos	Instrumento de captura	Periodicidad	Etapas
Confiabilidad del flujo de producción	PPC	— $PPC = \frac{\text{Tareas completadas}}{\text{Tareas comprometidas}} \times 100$	Plan de Trabajo Semanal (WWP)	de Tablero visual semanal del LPS	Semanal	Solo Etapa 2 *
	CNC de No Cumplimiento	— Causas No Cumplimiento Conteo y categorización de incumplimientos por familia de restricción	Reunión de cierre semanal del LPS	de Matriz de restricciones por categoría	Semanal	Solo Etapa 2 *
Desempeño del cronograma	SPI — índice de desempeño del cronograma	— $SPI = EV / PV$	Cronograma maestro y registro de avance	Plantilla EVM · MS Project	Corte semanal	Etapas 1 y 2
	SV Variación del Cronograma	— $SV = EV - PV$	Cronograma maestro y registro de avance	Plantilla EVM	Corte semanal	Etapas 1 y 2

Matriz de operacionalización de indicadores							
Dimensión	Indicador	Fórmula	Fuente de datos	Instrumento de captura	Periodicidad	Etapas	
Desempeño del costo	CPI — Índice de desempeño del Costo	$CPI = EV / AC$	Sistema de control costos del proyecto	Plantilla EVM · Reporte financiero	Corte semanal	Etapa 1 y 2	
	CV Variación del Costo	$CV = EV - AC$	Sistema de control costos del proyecto	Plantilla EVM	Corte semanal	Etapa 1 y 2	
Proyección al cierre	EAC Estimado hasta Completar el proyecto	$EAC = BAC / CPI$	CPI calculado en cada corte	Plantilla EVM	Corte semanal	Etapa 1 y 2	
Productividad operativa	Avance físico diario	$Avance = Losas fundidas / día$	Bitácora diaria de obra	Formato de avance diario	Diaria	Etapa 1 y 2	
	Rendimiento de mano de obra	$H-H/unidad = \sum \text{Horas-hombre} / \text{Unidades producidas}$	Bitácora diaria · Control de personal	Formato de control de cuadrillas	Diaria	Etapa 1 y 2	
	Rendimiento de maquinaria	$H-M/unidad = \sum \text{Horas-máquina} / \text{Unidades producidas}$	Bitácora diaria · Control de equipos	Formato de control de equipos	Diaria	Etapa 1 y 2	

Tabla 2. Matriz de Indicadores propuestos para el trabajo de grado

Nota: Fuente – Elaboración propia

3.6.11. Consolidación De Datos y Cierre de la Etapa 2

Finalizada la fase de intervención bajo el Last Planner System, se procedió a la consolidación exhaustiva de todas las métricas operativas y financieras registradas. El objetivo central de este cierre de fase es estructurar la base de datos empírica necesaria para cuantificar el desempeño en sus tres dimensiones: producción física, remoción de restricciones y fiabilidad sistémica. Esta consolidación proporciona los insumos paramétricos requeridos para ejecutar

el Análisis de Brechas (Gap Analysis), permitiendo determinar objetivamente el beneficio incremental de la Etapa 2 frente a la línea base tradicional (Etapa 1).

3.6.12. Estructura Del Análisis Post-Implementación

El análisis post-implementación se estructuró bajo tres líneas de evaluación interdependientes, diseñadas para triangular el desempeño operativo con los resultados macroeconómicos del proyecto:

- Consolidación de Métricas de Confiabilidad (Flujo): Cuantificación final del Porcentaje de Plan Completado (PPC) acumulado y categorización sistemática de las Causas de No Cumplimiento (CNC). Esta dimensión evalúa directamente la eficacia del Lookahead y de la gestión de restricciones para estabilizar el sistema de producción.
- Evaluación del Desempeño Financiero (Valor): Determinación de los índices finales de gestión mediante la metodología EVM (SPI y CPI). Esta métrica permite dictaminar la salud financiera de la obra y la protección de los plazos contractuales fijos tras la transición al modelo Lean.
- Análisis de Variabilidad y Productividad (Transformación): Contrastación estadística de los rendimientos físicos reales frente a la línea base original. El propósito es documentar cómo la mitigación de la incertidumbre incrementó la eficiencia global en el uso de los recursos.

La convergencia de estas tres dimensiones trasciende la simple recolección de datos, constituyendo el cierre formal de la fase de intervención empírica. Este marco analítico provee la evidencia científica indispensable para validar la viabilidad de la metodología propuesta, permitiendo demostrar haciendo uso del análisis de Brechas, la superioridad del modelo de planificación colaborativa frente al paradigma de gestión tradicional en un ecosistema aeroportuario de criticidad.

3.6.13. Estrategia De Visualización Analítica y Modelado de Datos

Una vez consolidada la información de ambas etapas operativas, se procedió al modelado gráfico de los indicadores de desempeño (KPI) mediante herramientas de visualización analítica. Este proceso no se limita a la exposición de datos, sino que permite el análisis del comportamiento dinámico de las variables a lo largo del tiempo, facilitando la

detección de tendencias, picos de variabilidad y puntos de inflexión en la productividad del proyecto.

La estrategia de visualización se fundamenta en la comparativa directa de series temporales, actuando como el mecanismo de validación visual para la hipótesis de mejora. Los principales productos analíticos derivados de este proceso incluyen:

- **Curvas de desempeño S (EVM):** Gráficos comparativos que integran el avance físico ejecutado frente a la línea base planificada. Estas curvas permiten interpretar el impacto de la gestión operativa sobre la salud financiera (CPI) y el cumplimiento del cronograma (SPI), contrastando los ritmos de recuperación entre la Etapa 1 y la Etapa 2.
- **Gráficos de control de confiabilidad (PPC):** Representación de la evolución temporal del Porcentaje de Plan Completado. Su objetivo es evidenciar empíricamente la estabilización del flujo de trabajo y el incremento en la predecibilidad de los frentes de intervención bajo el modelo LPS.
- **Diagramas de Pareto de las Causas de No Cumplimiento (CNC):** Identificación visual de las restricciones críticas mediante el principio de los "pocos vitales". Este análisis permite observar cómo la implementación del sistema transformó la naturaleza y frecuencia de los obstáculos enfrentados en la zona aire del aeropuerto.

La integración de estas herramientas permite una interpretación ágil y precisa del fenómeno estudiado. De este modo, se facilita la triangulación entre el análisis estadístico y la evaluación cualitativa de los beneficios incrementales derivados de la aplicación del Last Planner System en infraestructuras críticas.

3.7. Valoración De La Aplicación Del LPS

3.7.1. Análisis Comparativo e Interpretación de Indicadores De Desempeño (KPI)

Tras la culminación de la Etapa 2, se procede al análisis sistémico de los indicadores de desempeño (KPI) derivados del modelo Last Planner System. Este proceso trasciende la mera descripción estadística; se orienta a la interpretación fenomenológica de la productividad a lo largo del ciclo de ejecución, permitiendo diagnosticar la evolución de la eficiencia operativa en los distintos frentes de trabajo.

La validación de la viabilidad metodológica se fundamenta en un análisis de brechas (Gap Analysis) entre la línea base (Etapa 1 - Gestión Tradicional) y la fase de intervención (Etapa 2 - Gestión Lean), mediante el contraste de las siguientes dimensiones críticas:

- **Fiabilidad y Estabilidad del Flujo:** Comparativa del Porcentaje de Plan Completado (PPC) y evaluación de la reducción de la variabilidad en los ciclos operativos, lo que permite cuantificar el efecto de "blindaje de la producción" logrado por el sistema.
- **Sinergia Económico-Temporal:** Correlación entre los índices de desempeño del Valor Ganado (SPI y CPI) y la estabilidad del flujo de trabajo. Este análisis busca demostrar cómo la remoción de restricciones impacta directamente en la optimización de los costos directos e indirectos.
- **Retorno de Valor y Viabilidad Integral:** Evaluación del impacto del LPS en el margen de utilidad proyectado, mediante la mitigación de actividades no contributivas (desperdicios por espera) y la optimización de recursos en el entorno aeroportuario.

Este ejercicio de comparación técnica constituye la base empírica para dictaminar la viabilidad de la propuesta y fundamentar la escalabilidad de la filosofía Lean en proyectos de infraestructura de complejidad y severa restricción logística.

3.7.2. Análisis De Fiabilidad y Variabilidad Del Sistema: PPC y CNC

El análisis de confiabilidad del sistema de planificación se estructurará sobre dos ejes analíticos interdependientes: la medición de la fiabilidad de los compromisos a través del Porcentaje de Plan Completado (PPC) y el diagnóstico sistemático de la variabilidad operativa mediante las Causas de No Cumplimiento (CNC).

- **Evaluación de la Fiabilidad (PPC):** Este indicador métrico cuantificará la eficacia del proceso de planificación semanal y la capacidad del equipo de obra para honrar los compromisos de producción. El análisis longitudinal del PPC a lo largo del horizonte de ejecución actuará como el principal indicador de estabilidad, permitiendo correlacionar empíricamente la aplicación de acciones correctivas con el incremento en la predictibilidad de los frentes de trabajo, validando así la maduración del modelo de control.
- **Diagnóstico de Variabilidad (Análisis de Pareto de CNC):** Se ejecutará una sistematización de frecuencias sobre las causas raíz que imposibilitaron el cumplimiento de las asignaciones. La categorización de estas desviaciones (e.g.,

quiebres de suministro, restricciones logísticas de seguridad aeroportuaria o interferencias de terceros) permitirá, mediante el principio de Pareto, aislar los "pocos vitales" que inducen la mayor fricción en la producción. Este análisis metodológico es el catalizador para transitar de un modelo reactivo a una gestión proactiva, habilitando a la dirección de obra para focalizar sus recursos en la mitigación anticipada de las restricciones sistémicas de mayor impacto.

Es necesario resaltar que el análisis del comportamiento de estos indicadores se realizó en la Etapa 2, ya que son inherentes a la aplicación del LPS. Por consiguiente, en análisis de brecha de estos indicadores se realizará respecto al inicio y fin de la Etapa 2.

3.7.3. Evaluación De La Triple Restricción Mediante La Gestión del Valor Ganado (EVM)

Para fortalecer la validación empírica de los indicadores operativos de la filosofía Lean, se integró la metodología de Gestión del Valor Ganado (EVM) con el propósito de evaluar el desempeño del proyecto bajo la métrica de la triple restricción: alcance, tiempo y costo. Esta dimensión analítica permite determinar, con rigor matemático, la sostenibilidad financiera derivada de la aplicación del Last Planner System (LPS).

La evaluación metodológica se estructura en tres categorías de control paramétrico, articulando los datos obtenidos en la línea base tradicional frente a los resultados de la fase de intervención Lean:

- Índices de Eficiencia Relativa:
 - Índice de Desempeño del Costo (CPI): Evalúa la eficiencia financiera de la inversión al relacionar el valor del trabajo ejecutado con el costo real incurrido. Permite validar si las prácticas colaborativas mantienen la obra dentro de márgenes de rentabilidad sostenibles ($CPI \geq 1.0$).
 - Índice de Desempeño del Cronograma (SPI): Cuantifica el ritmo de avance físico frente al valor planificado. Demuestra empíricamente si la estabilización del flujo (reflejada en un PPC alto) se traduce en una velocidad de ejecución óptima ($SPI \geq 1.0$).
- Variaciones de Control Absoluto:
 - Variación del Costo (CV): Permite cuantificar en unidades monetarias si la remoción anticipada de restricciones generó un ahorro neto en el contrato, al mitigar desperdicios por reprocesos y tiempos de inactividad.

- Variación del Cronograma (SV): Facilita la verificación temporal para determinar si el incremento en la fiabilidad de la programación resultó en una recuperación real de los plazos o en la protección de los hitos contractuales.
- Métricas de Proyección y Previsibilidad:
 - Presupuesto Hasta la Conclusión (BAC): Constituye la línea base financiera de inversión total aprobada al inicio del contrato. Opera como la referencia base frente a la cual se evalúan todas las desviaciones de desempeño.
 - Estimación a la Conclusión (EAC): Proyecta el costo total de liquidación del proyecto fundamentado en la eficiencia histórica del sistema (CPI acumulado). Su cálculo es determinante para demostrar matemáticamente si el escudo de producción logrado en la Etapa 2 (LPS) tiene la capacidad de acercar el costo final de la obra (EAC) al presupuesto original estimado (BAC).

La triangulación entre los indicadores de flujo (fiabilidad operativa) y los indicadores de valor (eficiencia, variación y proyección) permite establecer una conclusión técnica sobre la viabilidad integral de la propuesta. Este enfoque sistémico trasciende el control en campo, demostrando consistente con la evidencia cómo el pensamiento Lean protege la rentabilidad, reduce la incertidumbre final y asegura la entrega de valor al cliente en proyectos de infraestructura aeroportuaria.

3.7.4. Análisis De Resultados

El análisis de resultados se fundamentó en un estudio comparativo de brechas (*Gap Analysis*) entre el modelo de gestión convencional (Etapa 1) y el sistema de planificación Lean (Etapa 2). Para validar el contraste, se aplica una triangulación de variables operativas y financieras.

La triangulación se construye sobre dos series temporales: la confiabilidad del flujo, medida por el PPC, y el desempeño financiero, medido por los indicadores del EVM. Ambas series se contrastan frente a las desviaciones presupuestarias registradas en cada etapa.

El propósito del análisis es determinar la incidencia del Last Planner System en la eficiencia de la producción. Para ello, se interpretan los índices SPI y CPI en función de la efectividad en la remoción de restricciones y de la predictibilidad alcanzada en los frentes de trabajo.

Finalmente, el estudio correlaciona la mitigación de las Causas de No Cumplimiento (CNC) con la optimización de los costos directos e indirectos. Esta correlación constituye la evidencia técnica que sustenta la viabilidad de la metodología en infraestructuras aeroportuarias.

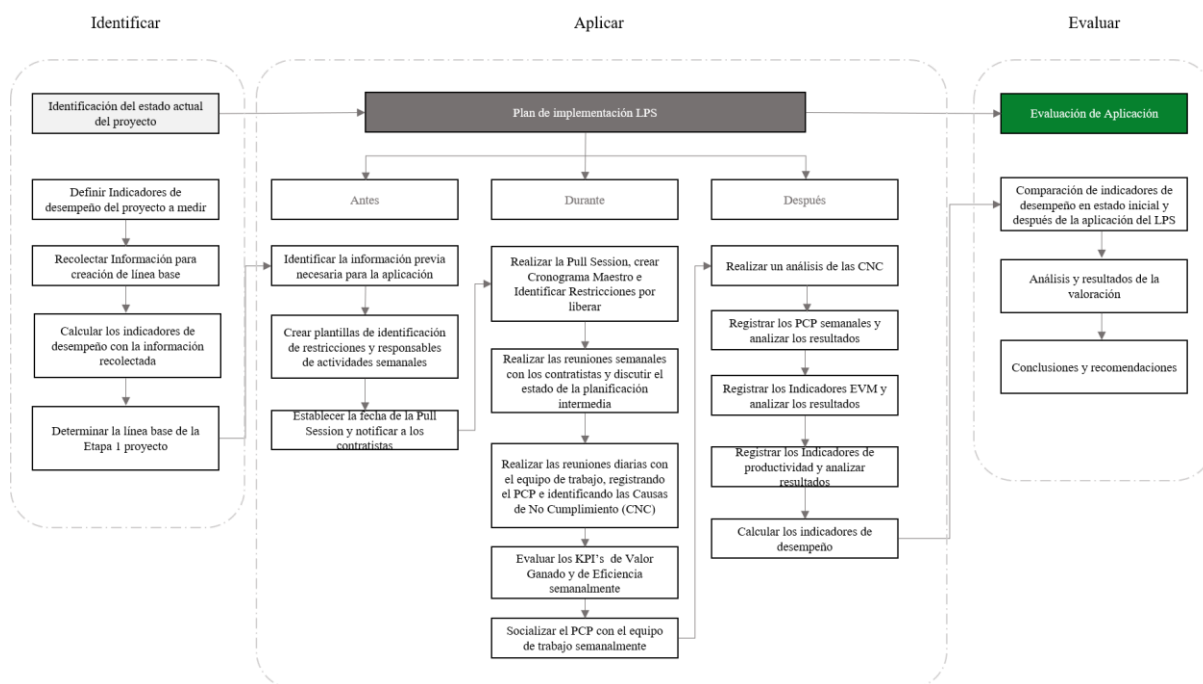


Figura 10. Esquema de metodología planteada

Nota: Fuente – Elaboración propia

4. Propuesta De Aplicación Del Last Planner System

4.1 · Contexto De Operación Aeroportuaria

La rehabilitación de la calle de rodaje Alfa se ejecutó en el Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón, principal terminal aérea del suroccidente colombiano, ubicado en el municipio de Palmira a aproximadamente 17 kilómetros de la ciudad de Santiago de Cali. A diferencia de una obra de pavimentación convencional, esta intervención se desarrolló dentro de una infraestructura crítica en operación continua, condición que define el conjunto de restricciones bajo las cuales debió planificarse y ejecutarse el proyecto.

4.1.1 · El Aeropuerto Como Sistema En Operación Permanente

Un aeropuerto en funcionamiento constituye un sistema operativo que no admite interrupciones totales. Durante el periodo de ejecución del proyecto, el aeropuerto mantuvo su operación regular, atendiendo tráfico de pasajeros y carga sin suspensión del servicio. Esta

condición de operación permanente impuso que la rehabilitación de la calle de rodaje se ejecutara mediante intervenciones parciales y programadas, sin que la obra comprometiera la seguridad ni la continuidad de las operaciones aeronáuticas.

El Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón cuenta con una red de calles de rodaje que permite la circulación ordenada y segura de aeronaves entre la pista principal (orientada S-N) y las plataformas de estacionamiento. La calle Alfa corre paralela a la pista para el desplazamiento longitudinal, mientras que las calles Bravo, Charlie y Delta conectan transversalmente ambas vías en distintos puntos, y las calles Papa y Romeo ofrecen acceso diagonal hacia las plataformas y la zona de carga, cumpliendo así los estándares de seguridad operacional de la OACI y la Aeronáutica Civil de Colombia.

La intervención de la calle de rodaje Alfa no podía planificarse como el cierre de un frente aislado, sino que debía coordinarse con la operación del conjunto de la infraestructura, en particular con las intersecciones Charlie, Bravo y Delta, que conectan la calle Alfa con el resto del sistema de rodaje y cuyo cierre afecta directamente las rutas de movimiento de las aeronaves.

4.1.2 · La Intervención Bajo Operación: Implicaciones Para La Ejecución

La condición de operación permanente del aeropuerto generó tres implicaciones directas sobre la ejecución del proyecto, las cuales constituyen el origen de la mayor parte de las restricciones documentadas en la sección 4.9

La primera implicación es la fragmentación temporal de la intervención. La obra solo pudo ejecutarse durante ventanas operativas autorizadas mediante NOTAM, documento mediante el cual la autoridad aeronáutica notifica el cierre temporal de una porción de la infraestructura. Estas ventanas se concentraron principalmente en horarios de baja operación, lo cual implicó que una parte significativa de las actividades críticas (en particular la fundición de losas y el curado) se programara en franjas nocturnas, con sus respectivas exigencias de iluminación, logística y coordinación.

La segunda implicación es la exigencia de seguridad operacional reforzada. La proximidad de la obra a calles de rodaje activas y a aeronaves en movimiento impuso protocolos estrictos de control de Foreign Object Debris (FOD), gestión de residuos de demolición, y delimitación de áreas de exclusión. Cualquier objeto, material o equipo que invadiera las áreas operativas activas representaba un riesgo directo para la seguridad aérea, lo

cual elevó significativamente las exigencias de orden, limpieza y disciplina en el frente de trabajo respecto a una obra civil convencional.

La tercera implicación es la dependencia de la coordinación con múltiples actores aeronáuticos. El acceso a la zona de obra requirió la coordinación permanente con el Centro de Control de Operaciones Aeroportuarias (CECOA), el control de tránsito aéreo, el operador del aeropuerto y la concesión. Cada ingreso de personal y maquinaria a la plataforma exigió autorizaciones, escolta operativa e inducción aeroportuaria, generando una carga de gestión administrativa continua que, como se documenta en las secciones siguientes, constituyó una proporción dominante de las restricciones gestionadas durante el proyecto.

4.1.3 · Del Contexto Operativo Al Problema De Planificación

Las condiciones descritas configuran un entorno donde la variabilidad y la incertidumbre operativa no son excepciones sino características estructurales. La ejecución no depende únicamente del avance técnico de la obra, sino de un conjunto de autorizaciones, ventanas y coordinaciones externas cuya disponibilidad fluctúa y que escapan al control directo del equipo de obra.

Bajo estas condiciones, un sistema de planificación tradicional basado exclusivamente en el método de la ruta crítica resulta insuficiente, dado que asume continuidad operativa y disponibilidad determinista de los recursos, supuestos que el entorno aeroportuario no satisface. Esta insuficiencia constituye la justificación operativa para incorporar un sistema de control de la producción capaz de gestionar explícitamente la variabilidad y las restricciones del entorno, función que cumple el Last Planner System cuya aplicación se desarrolla en las secciones siguientes.

4.2. Estado Actual Del Sistema De Planificación Del Proyecto

En su fase inicial (Etapa 1), el proyecto se administró mediante un sistema de planificación basado en el Modelo de Ruta Crítica (CPM). El principal instrumento de control era un Cronograma Maestro estático, elaborado en las etapas tempranas de oficina, el cual dictaba las fechas de inicio y fin de las actividades bajo la presunción de que los recursos y los frentes estarían disponibles según lo estimado teóricamente sin tener realmente en cuenta cuáles serían las restricciones para conseguirlo.

Este modelo carecía de un proceso de verificación tipo check-list y no contemplaba ventanas de planificación a mediano plazo, por el contrario, se planificaba a corto plazo. En

consecuencia, las metas de producción semanales no representan compromisos confiables basados en la capacidad real del sistema, sino simplemente "lo que debía hacerse" según el contrato. La ausencia de un filtro de fiabilidad antes de la ejecución provocó que las interferencias no resueltas llegaran directamente al nivel operativo, fragmentando la secuencia constructiva y limitando la eficiencia de la operación del proceso constructivo

4.3. Identificación De Restricciones y Problemas En La Gestión

El análisis detallado del proceso constructivo en los frentes de trabajo Intersección Charlie (C) y Charlie Bravo (CB) permitió visibilizar una densidad de factores limitantes que impedían el flujo continuo de la producción y que eran inherentes al modelo de gestión tradicional. El levantamiento empírico y exhaustivo de estas variables operativas se registró de manera sistemática en las Programaciones Intermedias (Lookahead Planning), documentando los bloqueos por cada actividad y por cada semana en la que se aplicó la metodología de planificación colaborativa (ver Anexo 2: Lookahead Planning (2WLAP)).

Bajo la óptica de la teoría de Lean Construction, una actividad solo puede ser ejecutada cuando todas sus precondiciones han sido plenamente satisfechas. Para diagnosticar la vulnerabilidad del sistema, y con el objetivo de elevar el análisis de estos datos hacia un modelo de gestión sistemático, las restricciones consolidadas en las programaciones semanales se categorizaron en cuatro ejes fundamentales:

4.3.1. Restricciones Logísticas

Las restricciones logísticas constituyeron la familia más numerosa del lookahead. Esta familia agrupa las precondiciones de ejecutabilidad relacionadas con la disponibilidad sincronizada de recursos humanos, materiales y equipos en el sitio de obra. Su gestión recayó principalmente en el residente de obra y el coordinador de frente, quienes operaron como responsables de desbloqueo logístico según la estructura de gobernanza descrita en la sección 3.6.5.

Un rasgo distintivo de esta familia en el contexto aeroportuario es la recurrencia semanal de la coordinación con escolta. A diferencia de las restricciones logísticas convencionales que se liberan una sola vez durante el ciclo de vida de una actividad, la escolta operativa debe gestionarse en cada ingreso a plataforma, lo cual eleva significativamente la carga administrativa del lookahead.

4.3.2. Restricciones Regulatorias

Las restricciones regulatorias agruparon las precondiciones de ejecutabilidad asociadas a permisos, autorizaciones, validaciones documentales y aprobaciones formales emitidas por entidades externas al equipo de obra (Aeronáutica Civil, concesión aeroportuaria, interventoría). Su gestión recayó principalmente en el Coordinador SST del proyecto y el Ing. Residente, en coordinación con los responsables de Centro de Control de Operaciones Aeroportuarias (CECOA).

Las restricciones regulatorias más frecuentes correspondieron a las autorizaciones recurrentes de ingreso (personal y maquinaria), la inducción aeroportuaria obligatoria y las aceptaciones formales de carteras topográficas por parte de interventoría. Una característica relevante de esta familia es la dualidad institucional: las autorizaciones documentales (ingreso, NOTAM, permisos) provienen de la concesión y la Aeronáutica Civil, mientras que las validaciones técnicas (carteras topográficas, densidades, ensayos) provienen de la interventoría. Esta dualidad obligó al equipo a mantener dos canales paralelos de gestión documental, lo cual fue absorbido por el sistema mediante la asignación diferenciada de responsables en la matriz de restricciones

4.3.3. Restricciones Físicas

Las restricciones físicas agruparon las precondiciones relacionadas con el estado material del frente de trabajo, la condición del entorno construido y la finalización efectiva de actividades constructivas predecesoras. Esta familia se concentra en lo que Koskela (1999) denomina precondiciones 5 (espacio físico) y 7 (trabajo previo), enfocadas al contexto de una cadena constructiva secuencial. Las restricciones físicas más recurrentes correspondieron a la liberación de módulos anteriores y al cumplimiento de avances mínimos en actividades predecesoras (compactación al 60%, conformación de subbase al 80%, asfaltado al 100% del frente).

Aunque numéricamente esta familia representa la menor proporción del lookahead, su importancia analítica es desproporcionada respecto a su frecuencia. Como se evidencia en la sección 5.2.2, las restricciones físicas constituyeron la causa dominante de los incumplimientos efectivamente materializados (CNC). Esto sugiere que las restricciones físicas, aunque menos numerosas, son inherentemente más difíciles de anticipar y remover que las restricciones administrativas, dado que dependen del ritmo real de ejecución y no de gestiones documentales o logísticas independientes.

4.3.4. Restricciones Temporales

Las restricciones temporales agruparon las precondiciones relacionadas con la disponibilidad de ventanas operativas para intervenir el pavimento aeroportuario. En el caso de estudio, esta familia se materializó casi exclusivamente como limitaciones impuestas por el NOTAM, documento mediante el cual la autoridad aeronáutica autoriza la intervención en intervalos horarios específicos y bajo condiciones operativas determinadas.

La implicación operativa de esta característica es significativa: el lookahead aeroportuario debe construirse alrededor de las ventanas NOTAM disponibles, no contra ellas. Las actividades críticas se programaron sistemáticamente dentro de los intervalos autorizados, y el Plan de Trabajo Semanal se ajustó para maximizar el aprovechamiento de cada ventana disponible.

4.4. Potencial De Aplicación Del LPS En El Entorno Del Proyecto

La rehabilitación de la calle de rodaje Alfa en el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón configura un contexto operativo que reúne las características teóricamente identificadas en la literatura como propicias para una implementación del Last Planner System. Esta sección argumenta el ajuste entre las propiedades estructurales del entorno y los componentes operativos del sistema Lean, así como las condiciones organizacionales que habilitaron su aplicación efectiva.

4.4.1 · Propiedades Del Entorno Que Justifican El Uso Del LPS

El entorno aeroportuario presenta cuatro propiedades estructurales que, bajo un sistema de planificación tradicional, generan variabilidad sistemática y desperdicios invisibles en términos del modelo TFFV de Koskela (Figura 5). Estas propiedades constituyen la justificación operativa para incorporar un sistema de control basado en flujo y no únicamente en transformación.

La primera propiedad es la alta dependencia de autorizaciones externas recurrentes. Como evidencia la sección 4.9, las restricciones regulatorias y logísticas están en todas las actividades del lookahead del proyecto, reflejando que cada actividad de obra debe superar una secuencia de autorizaciones (ingreso de personal, inducción aeroportuaria, NOTAM, coordinación con CECO) que se reactivan en cada ciclo semanal. Bajo un sistema push, estas autorizaciones se asumen como dadas y su incumplimiento se manifiesta como retraso emergente; bajo el LPS, se incorporan al lookahead como restricciones explícitas con responsables y fechas comprometidas.

La segunda propiedad es la fragmentación temporal del frente de trabajo. La operación aeronáutica continua impone ventanas NOTAM acotadas durante las cuales la intervención sobre la calle de rodaje es posible. Esta fragmentación implica que la ejecución no opera bajo un régimen continuo de turnos sino bajo un régimen de sprints operativos delimitados por la disponibilidad de la infraestructura. El LPS resulta particularmente adecuado para este régimen porque su unidad básica de planificación —el Plan de Trabajo Semanal— se ajusta naturalmente a la lógica de ventanas, mientras que el cronograma CPM tradicional asume continuidad temporal y se desajusta cuando esta no se materializa.

La tercera propiedad es la cadena constructiva secuencial con baja tolerancia a retrabajos. La rehabilitación de pavimento rígido aeroportuario exige una secuencia disciplinada de subprocesos (corte, demolición, excavación, estabilización, fundición, curado) donde cada actividad depende de la finalización efectiva de la anterior. Un retraso en una fase no se absorbe localmente, sino que se propaga aguas abajo comprometiendo ventanas operativas posteriores. Esta característica eleva el valor de los mecanismos de make-ready del LPS, que verifican la liberación de restricciones antes de comprometer una actividad al plan semanal, evitando así la materialización del retrabajo.

La cuarta propiedad es la multiplicidad de actores con jurisdicciones diferenciadas. El proyecto involucra simultáneamente al contratista (Masterplac), la interventoría, la concesión aeroportuaria, la Aeronáutica Civil, el operador aeronáutico y CECO, cada uno con autoridad sobre dimensiones distintas de la ejecución. Esta multiplicidad genera lo que la literatura denomina interdependencias horizontales no jerárquicas, las cuales son inadecuadamente gestionadas por sistemas de mando centralizado y se benefician sustancialmente de los espacios de coordinación colaborativa que el LPS institucionaliza mediante la Pull Session y la reunión semanal del WWP.

4.4.2 · Ajuste Entre Componentes Del LPS y Propiedades Del Entorno

Cada componente del Last Planner System responde de manera específica a una o varias de las propiedades identificadas en el apartado anterior. Este ajuste no es accidental: el LPS fue concebido por Ballard (2000) precisamente para entornos con alta variabilidad e interdependencia, características que el proyecto del aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón exhibe en grado pronunciado.

La Pull Session responde a la propiedad de multiplicidad de actores. Al construir el cronograma maestro colaborativamente con todos los involucrados, se incorporan al plan las

restricciones reales de cada actor, evitando el desajuste característico de los cronogramas elaborados unilateralmente desde la oficina de planificación.

El Lookahead 2WLAP responde a las propiedades de dependencia externa y cadena secuencial. Al adelantar la identificación de restricciones a un horizonte de dos semanas, el sistema dispone de tiempo suficiente para gestionar las autorizaciones recurrentes (regulatorias) y verificar el avance de las actividades predecesoras (físicas) antes de comprometer la ejecución. La elección de un horizonte de dos semanas, en lugar de las cuatro a seis semanas convencionales en construcción civil, se justifica por la cadencia de notamización mensual y por la velocidad de aprendizaje requerida en ventanas operativas fragmentadas.

El Weekly Work Plan responde a la propiedad de fragmentación temporal. Al organizarse alrededor del compromiso semanal sobre actividades cuyas restricciones han sido removidas, el WWP se ajusta naturalmente al ritmo operativo de las ventanas NOTAM y a la realidad de los frentes liberados disponibles, en lugar de imponer una programación rígida desacoplada de la operación aeronáutica.

El análisis de Causas de No Cumplimiento responde a la propiedad de baja tolerancia a retrabajos. Al categorizar sistemáticamente las razones por las que un compromiso no se cumplió, el sistema convierte los incumplimientos puntuales en aprendizaje organizacional, reduciendo progresivamente la probabilidad de que las mismas restricciones se materialicen en ciclos subsiguientes. Como se evidencia en la sección 5.2.2, esta dinámica de aprendizaje se materializó efectivamente en el proyecto.

4.4.3 · Condiciones Habilitantes Presentes En El Proyecto

El ajuste teórico entre el LPS y las propiedades del entorno constituye una condición necesaria pero no suficiente para la viabilidad de la implementación. La aplicación efectiva del sistema requirió además que se cumplieran ciertas condiciones organizacionales y técnicas, identificadas en la literatura como prerequisites críticos para implementaciones LPS exitosas (Mossman, 2018)

La primera condición habilitante fue la disposición del equipo directivo del proyecto a institucionalizar prácticas colaborativas. La transición desde un sistema de planificación centralizado hacia un sistema basado en compromisos firmes de los últimos planificadores requiere voluntad explícita de los niveles gerenciales para ceder autoridad de planificación al equipo de campo. En el proyecto, esta disposición se materializó en la dedicación de espacios

semanales formales para la reunión del WWP y el análisis de CNC, con asistencia de residencia, interventoría y subcontratistas.

La segunda condición fue la capacitación previa del equipo en los conceptos y herramientas del LPS. La adopción del sistema exige que los participantes comprendan distinciones conceptuales que no son intuitivas (la diferencia entre lo que debería hacerse, lo que puede hacerse y lo que se hará; la naturaleza de las restricciones removibles versus las inherentes; el sentido del compromiso firme). El equipo del proyecto recibió capacitación específica sobre estos conceptos antes del inicio de la Etapa 2, lo cual permitió que las sesiones operaran con un lenguaje común desde el primer ciclo.

La tercera condición fue la disponibilidad de instrumentos de gestión visual y documental. La operación del LPS requiere soporte material: tableros visuales para PPC, formatos digitales para el lookahead y el WWP, plantillas de registro de CNC. En el proyecto se desarrollaron y desplegaron estos instrumentos como parte del diseño metodológico (sección 3.6.6), lo cual garantizó que los ciclos semanales operaran con consistencia documental desde la primera semana.

La cuarta condición fue la estabilidad relativa del alcance contractual durante el periodo de implementación. El LPS opera mejor cuando el cronograma maestro permanece estable mientras el lookahead absorbe la variabilidad operativa. En el proyecto, el conjunto general del entregable se mantuvo estable, lo cual permitió que la línea base colaborativa construida en la Pull Session conservara su validez a lo largo de la implementación.

4.4.4 · Síntesis Del Argumento De Viabilidad

El análisis precedente permite afirmar que el caso de estudio configura un escenario empíricamente favorable para evaluar la aplicación del Last Planner System en proyectos de rehabilitación de pavimentos aeroportuarios. El entorno presenta las propiedades estructurales que el sistema fue diseñado para gestionar, los componentes operativos del LPS encuentran contrapartes específicas en las restricciones del proyecto, y las condiciones organizacionales habilitantes se cumplieron de manera suficiente. Esta convergencia entre marco teórico, propiedades del entorno y condiciones organizacionales constituye el fundamento de viabilidad sobre el cual se desarrolla la propuesta de implementación detallada en las secciones siguientes.

Conviene anticipar, sin embargo, que la viabilidad teórica no equivale a éxito asegurado. Como se documenta en el capítulo 5, la implementación efectiva del LPS atravesó una curva de adopción organizacional con un periodo inicial de exposición de la brecha entre

compromiso y cumplimiento, antes de alcanzar el régimen de madurez observado en las semanas finales del proyecto. El presente apartado argumenta que las condiciones estaban dadas para que esa curva fuera transitable; la evidencia empírica del capítulo 5 demuestra que efectivamente lo fue.

4.5. Objetivo y Alcance De La Propuesta

La propuesta de implementación del Last Planner System (LPS) en el proyecto de rehabilitación de la calle de rodaje Alfa se diseña como una intervención metodológica orientada a transformar la gestión de campo. A continuación, se definen los parámetros que delimitan esta propuesta:

4.5.1. Objetivo De La Propuesta

El objetivo principal de esta propuesta es establecer un sistema de control de producción basado en la planificación colaborativa y la liberación anticipada de restricciones, que permita estabilizar el flujo de trabajo y aumentar la confiabilidad del cumplimiento del cronograma en la Etapa 2 del proyecto.

De manera específica, la propuesta busca:

- Reducir la variabilidad: Minimizar la brecha entre lo que 'debe' hacerse (cronograma maestro) y lo que 'puede' hacerse (capacidad real), mediante el análisis de restricciones.
- Optimizar la comunicación: Formalizar canales de reporte entre los contratistas, la interventoría y el equipo de operaciones del aeropuerto.
- Garantizar la predictibilidad: Lograr que los compromisos semanales de avance físico se cumplan en un porcentaje superior al registrado en la etapa de gestión tradicional (Línea base).

4.5.2. Alcance De La Propuesta

El alcance de esta aplicación se circunscribe a la Segunda Fase (Etapa 2) de la rehabilitación de pavimentos de la calle de rodaje Alfa, abarcando desde la planeación de la secuencia de demolición y fundición hasta la terminación de los sellos de juntas y limpieza final.

Geográficamente, la propuesta cubre los frentes de trabajo activos durante el periodo de estudio, incluyendo la coordinación logística de suministros (concreto, acero) y la gestión de permisos de acceso a zona estéril. No forman parte del alcance de esta propuesta las actividades administrativas de liquidación de contratos ni las intervenciones en zonas de plataforma que no correspondan a la calle de rodaje Alfa.

Asimismo, la propuesta se integra con el Método del Valor Ganado (EVM) para la evaluación de resultados, pero su ejecución operativa se centra exclusivamente en los niveles de planificación del LPS: Pull Session, Lookahead y Plan Semanal.

4.6. Adaptación Del LPS Al Entorno Aeroportuario Específico

La implementación del Last Planner System en la Etapa 2 del proyecto inició con una fase de pre-acondicionamiento logístico y técnico, diseñada para garantizar que la transición al modelo colaborativo no interrumpiera el ritmo operativo del aeropuerto. Esta adaptación se estructuró a través del cumplimiento de requisitos previos y la ejecución de la primera Pull Session.

4.6.1. Requisitos Previos y Gestión De Restricciones Iniciales

Antes de convocar a los actores clave, se estableció una lista de chequeo de 'requisitos de entrada' para asegurar que la sesión de planificación fuera productiva y basada en datos reales. En esta etapa se verificó la disponibilidad de:

- Recursos técnicos: Planos de zonificación actualizados y especificaciones técnicas de mezclas de concreto.
- Permisos operacionales: Vigencia de credenciales de acceso a zona estéril y disponibilidad programada de escoltas ATC.
- Capacidad de respuesta: Disponibilidad de maquinaria y cuadrillas mínimas por parte de los subcontratistas.

Una vez validados estos puntos, se emitió una invitación formal a los contratistas y líderes de frente, definiendo los objetivos de la reunión y la información específica (rendimientos y dependencias) que cada uno debía aportar.

4.6.2. Ejecución De La Pull Session y Definición Del Cronograma Maestro

La sesión inició con una fase de sensibilización sobre la filosofía Lean, exponiendo la necesidad de migrar hacia un sistema de planificación que protegiera la producción de la variabilidad detectada en la Etapa 1. El proceso se desarrolló bajo la siguiente lógica:

- **Identificación de Restricciones Colaborativas:** Cada contratista expuso los cuellos de botella para sus actividades (suministros, interferencias entre frentes o demoras logísticas). Estos datos fueron sistematizados y clasificados para establecer una secuencia de liberación organizada, evitando que las restricciones se convirtieran en detenciones de obra.
- **Establecimiento de Hitos de Control:** Se alinearon las necesidades del cliente (Aerocali/Aerocivil) con las capacidades de la constructora y los subcontratistas, fijando hitos contractuales y operativos.
- **Secuenciación y Zonificación:** Utilizando la zonificación definida por la Dirección de Obra, se realizó la programación 'desde el fin hacia el inicio' (Pull Planning), registrando los tiempos de ejecución por frente.

Como resultado de este proceso colaborativo, se consolidó el Cronograma Maestro. Este instrumento, modelado inicialmente en una matriz de gestión y posteriormente formalizado en una hoja de Excel de programación (CPM), se convirtió en la línea base visual de la Etapa 2, permitiendo un seguimiento dinámico y semanal de la evolución del proyecto.

4.7. Herramientas Complementarias

Para operacionalizar el Last Planner System y garantizar que la planificación se transforme en ejecución efectiva, se implementó un ecosistema de herramientas complementarias. Estas herramientas permitieron gestionar la variabilidad y establecer un flujo de retroalimentación constante entre la gerencia y el frente de obra.

4.7.1. Análisis y Matriz De Gestión De Restricciones

La gestión de restricciones se consolidó como la herramienta preventiva por excelencia. Se implementó una Matriz de Restricciones dinámica, la cual permitía identificar los obstáculos (permisos ATC, suministro de concreto, disponibilidad de escoltas, condiciones climáticas) antes de que estos afectaran la ruta crítica.

- Proceso: Cada restricción identificada fue asignada a un responsable con una fecha límite de liberación (fecha 'debe estar listo').
- Objetivo: Asegurar que solo las actividades que estuvieran 'libres' de restricciones pasaran a la programación semanal, protegiendo así la producción de interrupciones evitables.

4.7.2. Porcentaje De Plan Completado (PPC) y Análisis De Causas Raíz

Como métrica principal de desempeño, se utilizó el PPC. Este indicador cuantitativo permitió medir la confiabilidad del sistema de planificación semana tras semana.

- Medición: El PPC se calculó dividiendo el número de actividades completadas según lo prometido entre el número total de actividades programadas para esa semana.
- Causas de No Cumplimiento (CNC): Por cada actividad no completada, se registró obligatoriamente una causa raíz (falla de materiales, mano de obra, logística aeroportuaria, etc.). Este registro no se utilizó con fines punitivos, sino como una fuente de aprendizaje para evitar la repetición de errores en ciclos futuros.

4.7.3. Estructura De Reuniones De Seguimiento (Rutinas De Gestión)

La comunicación colaborativa se formalizó mediante una estructura de reuniones rítmicas:

- Reunión de Planificación Semanal: Espacio donde los 'Últimos Planificadores' revisaban el estado de las restricciones y establecían los compromisos para la semana siguiente.
- Reuniones Diarias de Pie (Daily Huddles): Sesiones breves de máximo 15 minutos al inicio de la jornada en el frente de obra (Calle de Rodaje Alfa). En estas reuniones se validaba el cumplimiento del día anterior, se coordinaban los movimientos de maquinaria con los escoltas y se ajustaban detalles logísticos inmediatos.

Esta infraestructura de control permitió que el proyecto pasara de una supervisión reactiva a una gestión proactiva, donde la información fluía en tiempo real para la toma de decisiones.

4.8. Plan De Aplicación Escalonada

4.8.1. Fase Piloto De Sensibilización (Semana 1-2)

Se inició con la aplicación del LPS en un frente de trabajo específico de la calle de rodaje Alfa. Durante este periodo, se realizaron las primeras reuniones de planificación semanal con un grupo reducido de 'Últimos Planificadores'. El objetivo fue familiarizar a los subcontratistas con los conceptos de 'compromiso' y 'causa de no cumplimiento' (CNC), antes de masificar el uso de los formatos.

4.8.2. Fase De Integración Operativa (Semana 3-5)

Una vez validados los canales de comunicación y la agilidad en la remoción de restricciones, se escaló la metodología a la totalidad de los frentes activos. En esta fase se consolidó la rutina de las reuniones de pie (Daily Huddles) y se integró el análisis de restricciones dentro del Lookahead de dos semanas (2WLAP). Se puso especial énfasis en la precisión del reporte para alimentar de forma confiable el PPC.

4.8.3. Fase De Estabilización y Madurez (Semana 6 En Adelante)

En esta etapa, el sistema operó de manera autónoma. La cultura colaborativa permitió que las lecciones aprendidas de las semanas previas redujeran de manera significativa las CNC por fallas logísticas internas. Esta fase fue fundamental para recolectar los datos finales que permiten la triangulación con los indicadores de Valor Ganado (EVM), garantizando que la información reflejara un proceso ya maduro y no un experimento aislado.

Este despliegue escalonado garantizó que el sistema no fuera percibido como una carga administrativa adicional, sino como una herramienta de apoyo que facilitaba la labor de los contratistas frente a las estrictas exigencias de la interventoría y Aerocali.

4.9. Primera Planificación — Cronograma Maestro

Como paso previo a la estructuración del cronograma maestro y con el fin de optimizar el flujo de trabajo bajo los principios de Lean Construction, se definió una zonificación operativa para la Etapa 2. Esta subdivisión permitió gestionar el proyecto en paquetes de trabajo manejables, facilitando la asignación de recursos y la liberación de restricciones específicas por área de intervención.

La zonificación operativa de la Etapa 2 no se definió exclusivamente por criterios de productividad constructiva, sino que respondió a un esquema de liberación de frentes determinado por el Aeropuerto. Esta sectorización en las intersecciones Charlie, Charlie-Bravo

y Charlie-Delta fue una condición mandatoria para garantizar el cumplimiento de los protocolos de seguridad operacional en el área de movimiento.

La división por intersecciones permitió que el aeropuerto gestionara de manera controlada el tráfico de aeronaves y vehículos de apoyo terrestre, manteniendo despejadas las zonas adyacentes a la intervención. En consecuencia, cada frente de trabajo funcionó como un 'paquete de seguridad', donde el inicio de las actividades constructivas estuvo supeditado a la liberación formal de la zona por parte de la oficina de operaciones del aeropuerto. Esta dependencia externa obligó a que la planificación del Last Planner System fuera flexible.

Los hitos de ejecución se alinearon con las ventanas de oportunidad otorgadas por la administración aeroportuaria, lo que aseguró la continuidad de las operaciones aéreas.

La Etapa 2 se fragmentó en tres frentes de trabajo estratégicos, definidos por su ubicación geométrica y su impacto en la operatividad de la calle de rodaje:

- Frente Intersección Charlie (C): Consistente en la rehabilitación de 8 losas. Este sector fue priorizado por su nivel de deterioro y su ubicación estratégica para el giro de aeronaves.
- Frente Intersección Charlie-Bravo (CB): Compuesta por 5 losas por rehabilitar. Al ser el tramo de menor cantidad de unidades, se planificó como un nodo de transición logística.
- Frente Intersección Charlie-Delta (CD): El sector más extenso de la etapa, con un total de 10 losas a intervenir, requiriendo una coordinación intensiva con el equipo de pavimentación y sellos.

La distribución espacial de estas intersecciones y la secuencia lógica de intervención se presentan a continuación, permitiendo visualizar la segmentación del área de movimiento del aeropuerto:

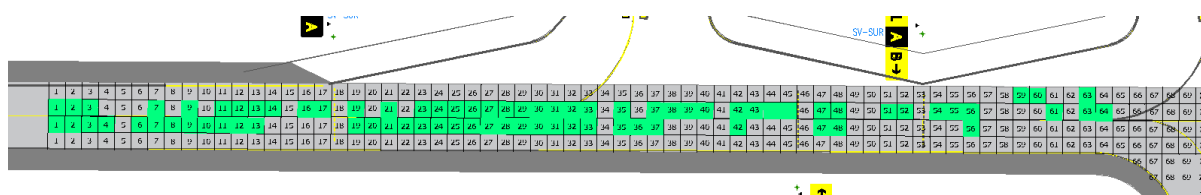


Figura 11. Plano de Etapa 1 – Losas desde módulo 1 al módulo 64

Nota: Fuente – Elaboración Propia

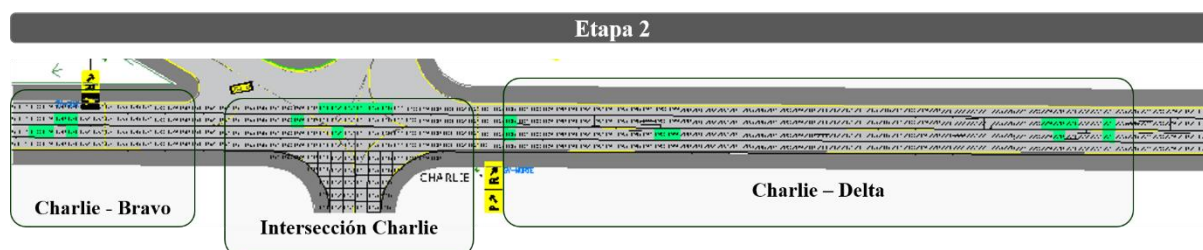


Figura 12. Plano de Etapa 2 – Losas de módulos entre 169 y 234

Nota: Fuente – Elaboración propia

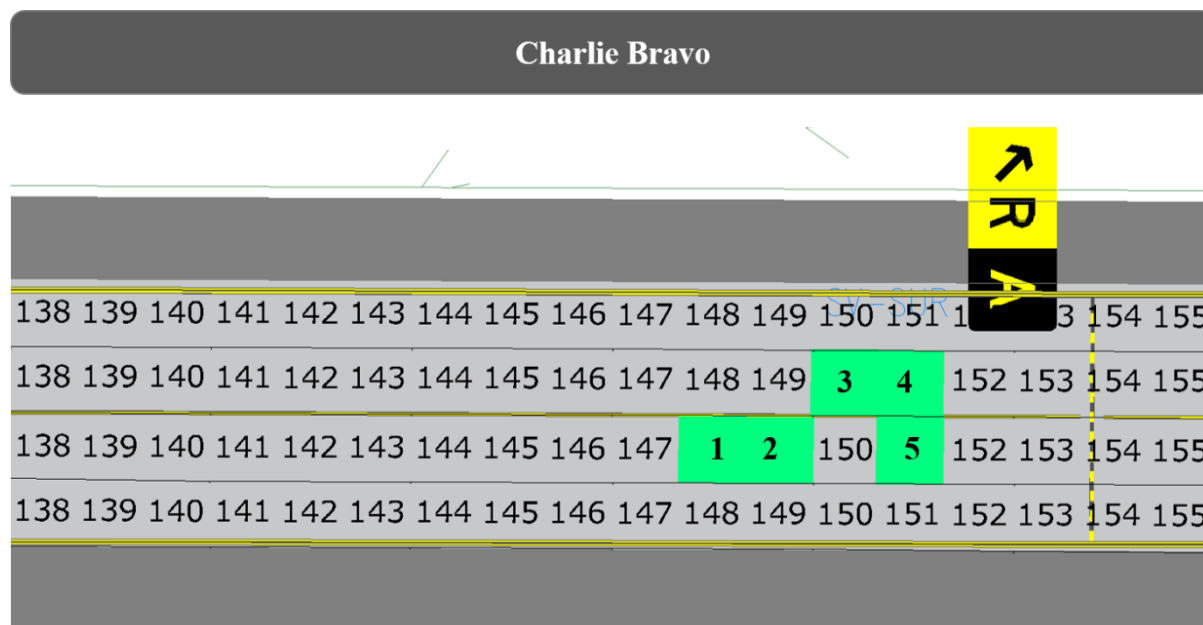


Figura 13. Plano Zona Charlie – Bravo

Nota: Fuente – Elaboración propia

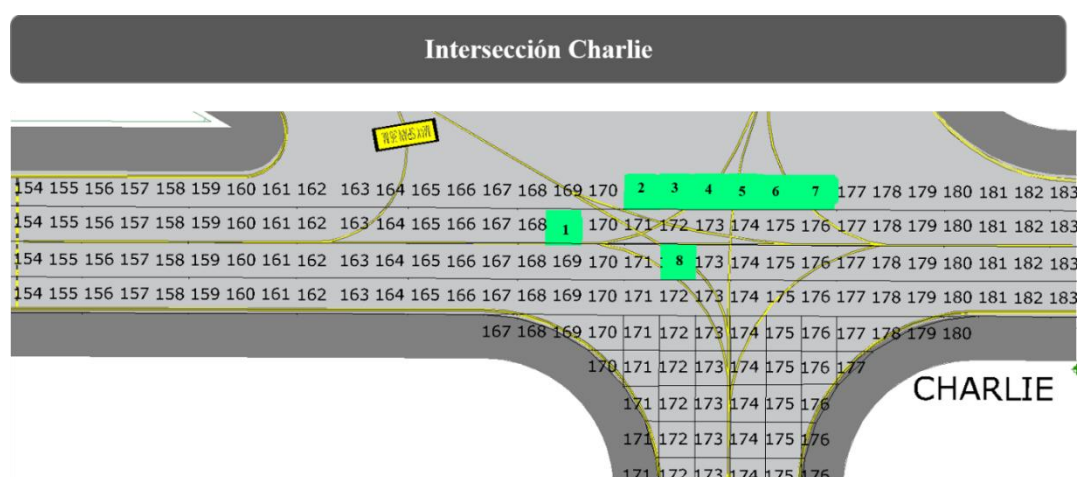


Figura 14. Plano Zona Intersección Charlie

Nota: Fuente – Elaboración propia

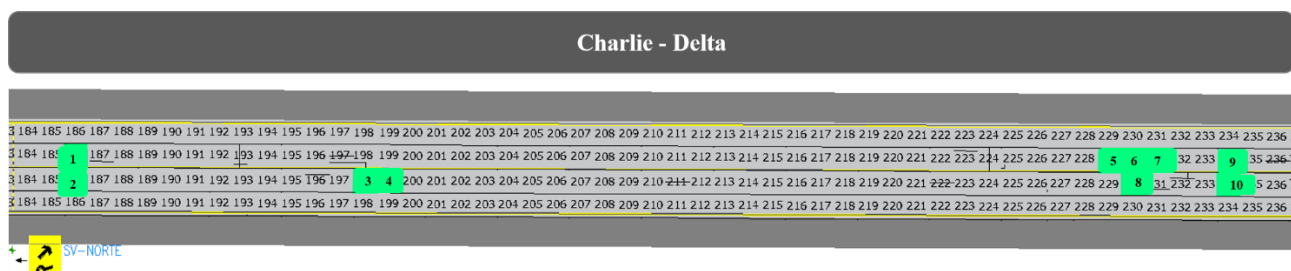


Figura 15. Plano Zona Charlie – Delta

Nota: Fuente – Elaboración propia

La proyección del Cronograma Maestro se fundamentó en la lógica de 'planificación inversa' (Pull Planning), donde el objetivo no es simplemente listar tareas, sino consolidar los eventos clave que garantizan la entrega de la infraestructura aeroportuaria en condiciones de seguridad y calidad.

4.9.1. Hitos Del Proyecto

Durante el desarrollo de la Pull Session, se realizó un proceso de concertación técnica para determinar los hitos del proyecto. Estos puntos de control no fueron asignados de manera unilateral por la dirección, sino que surgieron de la triangulación de información entre los tres actores principales: el cliente (necesidades operativas), los contratistas (capacidades de ejecución) y la empresa constructora (coordinación logística).

La identificación de estos hitos permitió establecer los hitos de entrega parcial, asegurando que la ruta crítica de la rehabilitación en la calle de rodaje Alfa no se viera comprometida por la variabilidad del entorno. Los hitos determinados, que abarcan desde los procesos administrativos previos hasta la liberación final de los frentes de trabajo, se detallan a continuación:

Hitos Del Proyecto – Etapa 2	
A - Inicio de Obra	18 - Asfaltado de 2 primeras losas del frente
1 - Hojas de Vida de Losas Aprobadas por Interventoría	19 - Instalación del 100% de las Varillas de las losas del frente
2 - Finalización de todos los Cortes de las losas del frente	20 - Fundición del 100% de los pavimentos de las losas del frente

Hitos Del Proyecto – Etapa 2

3 - Demolición de primeras 4 Losas del frente	21 - Espera de 7 días después de la fundición de la última losa del pavimento
4 - Excavación del 60% de las losas del frente	22 - Sello del 100% de las juntas de las losas del frente
5 - Llegada de Vibrocompactador por parte de Subcontratista	23 - Terminación del 100% de Sub base granular de losas del frente anterior
6 - Compactación de la subrasante del 60% de las losas del frente	24 - Hojas de Vida de Losas Aprobadas por Interventoría
7 - Conformación del 80% de Sub base granular de las losas del frente	25 - Finalización de todos los Cortes de las losas del frente
8 - Asfaltado del 100% de las losas del frente	26 - Demolición del 100% de las losas del frente
9 - Instalación del 100% de las Varillas de las losas del frente	27 - Excavación del 60% de las losas del frente
10 - Fundición del 100% de los pavimentos de las losas del frente	28 - Compactación de la subrasante del 60% de las losas del frente
11 - Espera de 7 días después de la fundición de la última losa del pavimento	29 - Conformación del 80% de Sub base granular de las losas del frente
12 - Sello del 100% de las juntas de las losas del frente	30 - Asfaltado del 100% de las losas del frente
13 - Terminación del 100% de Sub base granular de las losas del frente anterior	31 - Instalación del 100% de las Varillas de las losas del frente
14 - Hojas de Vida de Losas Aprobadas por Interventoría	32 - Fundición del 100% de los pavimentos de las losas del frente
15 - Finalización de todos los Cortes de las losas del frente	33 - Sello del 100% de las juntas de las losas del frente
16 - Demolición de primeras 4 Losas del frente	B - Fin de obra
17 - Llegada de personal de imprimación manual	

Tabla 3. Hitos del proyecto en la Etapa 2

Nota: Fuente – Elaboración Propia

Para facilitar el seguimiento y asegurar la alineación de todos los involucrados, estos hitos se integraron en el cronograma maestro mediante una codificación visual de rombos rojos posicionados en el margen superior de la línea de tiempo. Esta representación gráfica responde a los principios de Gestión Visual (Visual Management), permitiendo que los 'Últimos Planificadores' identifiquen de manera inmediata las metas críticas y los compromisos de entrega sin ambigüedades. Al ubicar estos indicadores en la parte superior, el cronograma se convierte en una herramienta de consulta rápida en campo, donde la proximidad de las actividades hacia el rombo rojo dicta la urgencia de la liberación de restricciones y la prioridad del flujo de trabajo.



Figura 16. Pull Session ejecutada en obra

Nota: Fuente – Elaboración Propia

4.9.2. Dinámica De Control y Toma De Decisiones

El control de la ejecución en la Etapa 2 se alejó del seguimiento estático tradicional para convertirse en un proceso dinámico de retroalimentación semanal. El Cronograma Maestro no solo funcionó como una hoja de ruta, sino como la principal herramienta de Gestión Visual para comunicar el estado real del proyecto a todos los interesados (interventoría, contratistas y dirección de obra).

El seguimiento se realizó mediante un sistema de marcas visuales sobre el cronograma, actualizándose cada semana tras las reuniones de planificación. Se definieron los siguientes códigos de estado para permitir una lectura rápida del desempeño:

- **Líneas de Progreso (Línea de Tiempo):** Se trazó una línea vertical indicando la fecha de corte actual. El desfase de las actividades respecto a esta línea permitió identificar de inmediato la salud del cronograma.

- **Líneas Diagonales:** Representación gráfica de las actividades efectivamente completadas. La línea diagonal adopta un código cromático estandarizado que vincula directamente la tarea con la semana exacta de su finalización. Esto facilita el contraste visual e instantáneo entre el periodo de ejecución real y la ventana de programación original.
- **Círculos Verdes (Adelanto):** Ubicados sobre las actividades que se completaron antes de la fecha programada o que presentan un rendimiento superior al previsto.
- **Círculos Rojos (Atraso/Incumplimiento):** indicadores de alerta que señalan actividades que no se completaron en la semana estipulada. Cada círculo rojo activó automáticamente un análisis de Causas de No Cumplimiento (CNC).

Este sistema permitió que el control fuera binario y transparente. Al visualizar los 'círculos rojos' en las intersecciones Charlie o Bravo, el equipo de gestión pudo priorizar la asignación de recursos o la liberación de restricciones críticas para recuperar el ritmo en la semana siguiente. De esta forma, el cronograma maestro dejó de ser un documento de archivo para convertirse en el tablero de control operativo de la obra.

	Localización
	Corte con Disco para pavimentos
	Demoliciones
	Excavación
	Conformación de la Sub Rasante
	Sub base granular mejorada
	Asfalto
	Varillas Lisas
	Pavimento MR 50
	Sello de Juntas

Figura 17. Nomenclatura de Actividades de Cronograma Maestro de la Etapa 2

Nota: Fuente – Elaboración Propia

	Semana 1
	Semana 2
	Semana 3
	Semana 4
	Semana 5
	Semana 6
	Semana 7
	Semana 8
	Semana 9

Figura 18. Nomenclatura de cortes realizados en el cronograma de ejecución

Nota: Fuente – Elaboración Propia

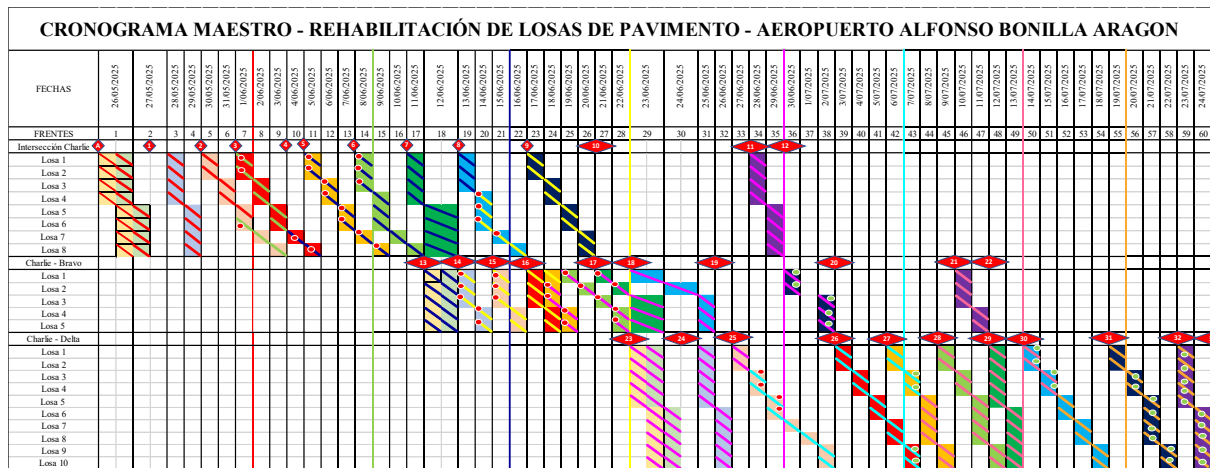


Figura 19. Cronograma Maestro Etapa 2

Nota: Fuente – Elaboración Propia



Figura 20. Retroalimentación del avance de obra a partir de revisión de Cronograma Maestro

Nota: Fuente – Elaboración Propia

4.9. Planificación Intermedia (Lookahead)

Dada la naturaleza crítica y el plazo ajustado de ejecución del proyecto (2 meses), la planificación intermedia se estructuró mediante ventanas de trabajo de dos semanas (2WLAP). Este horizonte temporal se seleccionó por ser el periodo óptimo para anticipar la resolución de restricciones sin perder la precisión necesaria para la toma de decisiones inmediata en un entorno aeroportuario.

4.9.1. El Lookahead Como Filtro De Restricciones

Este nivel de planificación permitió realizar un ejercicio de 'traducción' del cronograma maestro a actividades ejecutables. Durante este proceso, se integraron y gestionaron las restricciones identificadas originalmente en la Pull Session, asegurando que toda tarea programada para las próximas dos semanas contara con los insumos, permisos y condiciones logísticas necesarios antes de su ejecución.

Al utilizar esta ventana de dos semanas, el equipo pudo tener:

- Proactividad Logística: Gestionar con antelación los accesos a zona estéril y la coordinación de escoltas, evitando que el trabajo se detuviera por trámites administrativos.
- Visibilidad de Flujos: Identificar interferencias entre los distintos contratistas encargados de la rehabilitación de las intersecciones Charlie, Bravo y Delta, permitiendo ajustar la secuencia de trabajo semanalmente.
- Blindaje de la Producción: Asegurar que ninguna actividad fuera incorporada al Plan de Trabajo Semanal si aún presentaba restricciones pendientes, protegiendo así la confiabilidad del sistema.

4.9.2 Formato De Gestión De Restricciones

Para asegurar el control y la trazabilidad de los flujos de trabajo en los frentes de la calle de rodaje Alfa, se diseñó una matriz de gestión integrada. A continuación, se describen los componentes, roles y parámetros que conformaron la estructura de seguimiento

4.9.2.1 Roles y Responsables

- Roles: Se definieron tres niveles: Gestor de Obra (responsable del cumplimiento global), Líder de Frente (responsable de la ejecución en campo) y Coordinador Logístico/ATC (responsable de la liberación de accesos).
- Responsables: Cada restricción fue asignada a un responsable específico con nombre y cargo, asegurando que la rendición de cuentas fuera directa y clara.

4.9.2.2 Gestión Visual y Codificación

- ID: Código alfanumérico único asignado a cada tarea para su rastreo en el cronograma maestro y reportes semanales.

- Colores de actividades: Sistema de codificación cromática utilizado para identificar la semana programada de ejecución, facilitando la detección visual de variabilidad.
- Actividades Cerradas: Marcador binario (Si/No) que indica la finalización total de una tarea.

4.9.2.3. Clasificación De Restricciones Por Proceso Constructivo.

Cada actividad fue analizada bajo condiciones de restricción específicas:

- Localización: Disponibilidad del frente de trabajo según la zonificación del aeropuerto.
- Cerramiento: Instalación de señalización y barreras de seguridad operacional (Safety).
- Demolición / Excavación: Verificación de redes subterráneas y permisos de movimiento de tierras.
- Conformación de Subrasante / Relleno con Subbase: Aprobación de niveles, densidades y calidad de materiales.
- Instalación de Varillas Lisas / Fundición de Pavimento: Disponibilidad de acero, formaletas y equipos de fundición.
- Imprimación y Sellos: Condiciones climáticas y tiempo de curado requerido para la reapertura del tráfico.

4.9.2.4. Indicadores Temporales y De Cumplimiento

- Fecha Requerida: Fecha límite establecida por el Cronograma Maestro para iniciar una actividad sin afectar la ruta crítica.
- Fecha Comprometida: Fecha acordada en la sesión de planificación entre los Últimos Planificadores tras considerar la disponibilidad real de recursos.
- Fecha Realizada: Fecha efectiva en la que se concluyó la actividad en campo.
- Días Abierta: Diferencia temporal entre la fecha de detección de una restricción y su resolución efectiva.
- Restricción Liberada: Indicador de estado (Libre/Bloqueado) que habilita o inhabilita el paso al Plan de Trabajo Semanal.

- Porcentaje de Restricciones no liberadas: KPI que mide la eficiencia del sistema en la resolución de cuellos de botella; un porcentaje elevado activa de inmediato una revisión de la estrategia de gestión.

Con el horizonte de trabajo de dos semanas (2WLAP) debidamente filtrado y el estado de las restricciones verificado, se procedió a la consolidación de la tercera fase de planificación: el Plan de Trabajo Semanal (Weekly Work Plan).

Este nivel representó el punto de inflexión en la gestión, donde la visión intermedia del Lookahead se tradujo en compromisos diarios firmes y ejecutables. A partir de la información validada en el 2WLAP, se establecieron las metas operativas semana a semana, permitiendo a los líderes de frente asegurar la disponibilidad de recursos, la logística de acceso a la pista y la coordinación con el personal de escoltas de seguridad. Así, el sistema cerró el ciclo de planificación, permitiendo que cada actividad programada contara con las condiciones necesarias para ser completada con éxito y sin interrupciones en el área de movimiento del aeropuerto.

PLANIFICACIÓN INTERMEDIA											
FORMATO PARA REVISION DE RESTRICCIONES DE ACTIVIDADES											
PROYECTO:	REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS AEROPUERTO ALFONSO BONILLA ARAGÓN FASE 2			FECHA INICIO DE LA OBRA: 26 DE MAYO DE 2025				FECHA SEMANA ACTUAL:		19-may-25	
LIDER DE PLANIFICACIÓN	Ing. Juan David Londoño							RESTRICCIONES A LIBERAR EN LA SEMANA No		0	
SEMANA ACTUAL	No	-1	19/5/2025					Porcentaje de restricciones		0	
SEMANA EN REVISIÓN	No	1 y 2	26/5/2025					Restricciones no liberadas		0	
RESTRICCIONES ABIERTAS (Recuerde pasar al cuadro inferior las restricciones cerradas para la siguiente reunión)											
ID ACTIVIDAD EN EL PLAN MAESTRO	ACTIVIDAD SEGÚN PLAN MAESTRO	Fecha de identificación	Restricción	Responsable		Fecha Requerida	Fecha comprometida	Fecha realizada	Días abierta	Restricción liberada?	Email para enviar tareas al responsable
				Sub Contratista / Empresa	Nombre						
4	Cerramiento - Intersección Charlie	12/05/2025	Autorización ingreso personal	Masterplac	Siso						
			Autorización ingreso maquinaria	Masterplac	Siso						
			Disponibilidad de escolta	Masterplac	Residente						
			Limitación por NOTAM	Masterplac	Residente						
			Demoras CECOÁ- concesión	Masterplac	Residente						
			Inducción aeroportuaria	Masterplac	Siso						
			Permisos / aprobaciones pendientes	Masterplac	Residente						

Figura 21. Formato de Planificación Intermedia.

Nota: Fuente – Elaboración Propia

4.10. Plan De Trabajo Semanal (Weekly Work Plan)

Una vez validadas las restricciones en la planificación intermedia (2WLAP), el ciclo de gestión culminaba con la Planificación de Trabajo Semanal. Este nivel operativo, fundamentado en la metodología Last Planner System, permitió la ejecución de tareas bajo una lógica de compromisos firmes entre el equipo constructor y los subcontratistas.

La planificación semanal no solo servía para proyectar la carga de trabajo, sino para medir el desempeño real frente a lo programado, garantizando que el Cronograma Maestro se

cumpliera de manera efectiva. Para este control, se utilizó una estructura de datos detallada que integraba las siguientes variables:

4.10.1. Estructura De Control Semanal

- ID de Actividad y Cantidad de Obra: Identificadores únicos y volumen de intervención (m² de losa, m³ de excavación, etc.), que permitieron un seguimiento preciso del alcance.
- Codificación de Colores: Mantenimiento de la estrategia de gestión visual para identificar la semana de corte respecto a la línea base.
- Cantidad de Ejecución y Distribución Semanal: Registro del avance diario, permitiendo visualizar la distribución del esfuerzo constructivo a lo largo de los días de la semana.
- % de Avance y % Real de Ejecución: Comparativa entre el progreso teórico esperado y el ejecutado en campo, fundamental para la detección temprana de cuellos de botella.
- Porcentaje del Plan Completado (PPC): El indicador de fiabilidad por excelencia del sistema, calculado como la relación entre las actividades terminadas según lo comprometido y el total de actividades programadas.
- Causas de No Cumplimiento (CNC): Clasificación sistemática de las razones raíz detrás de cada actividad incumplida, actuando como la base de datos para la mejora continua del proceso.

PLAN DE CORTO PLAZO											Inicio Período:		26/may/2025		
PROYECTO: REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS CALLE DE RODAJE ALFA - ALFONSO BONILLA ARAGÓN											Fin Período :		01/jun/2025		
ID	Actividad o tareas	CANTIDAD DE OBRA	UN	Semana 01							Compromisos			0%	Causas de No Cumplimiento
				1	2	3	4	5	6	7	% Comp	% Real	Responsable Actividad o Tarea		
				L	M	M	J	V	S	D					
1	Cerramiento Intersección Charlie	50 ML		0							100%	0%	Residente Masterphac	0	
2	Localización Intersección Charlie	297.68 M2		0							100%	0%	Residente Masterphac	0	
3	Corte Losa 1 - Intersección Charlie	37.21 M2					0				100%	0%	Residente Masterphac	0	
4	Corte Losa 2 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
5	Corte Losa 3 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
6	Corte Losa 4 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
7	Corte Losa 5 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
8	Corte Losa 6 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
9	Corte Losa 7 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
10	Corte Losa 8 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
11	Demolición Losa 1 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
12	Demolición Losa 2 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
13	Demolición Losa 3 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
14	Demolición Losa 4 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
15	Demolición Losa 5 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
16	Demolición Losa 6 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
17	Excavación Losa 1 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	
18	Excavación Losa 2 - Intersección Charlie	37.21 M2									100%	0%	Residente Masterphac	0	

Figura 22. Plantilla de Programaciones de trabajo semanal (WWP)

Nota: Fuente – Elaboración Propia

Este registro detallado permitió pasar de una administración basada en suposiciones a una gestión basada en datos de fiabilidad, donde el indicador PPC se convirtió en la métrica clave para evaluar la madurez de la ejecución en los frentes de la calle de rodaje Alfa.



Figura 23. Socialización de la Planificación de trabajo semanal en reuniones cortas (de pie) al inicio de jornada de trabajo

Nota: Fuente – Elaboración Propia

La implementación de las tres capas de planificación descritas, cronograma Maestro, Planificación Intermedia (2WLAP) y Planificación Semanal, no funcionó como una secuencia aislada, sino como un sistema de retroalimentación constante. La información recolectada a través del cálculo del PPC y el registro de las CNC en las reuniones semanales de los 'Últimos Planificadores' permitió ajustar la estrategia de obra en tiempo real.

Este ciclo de aprendizaje colectivo evitó que las desviaciones detectadas en un frente de trabajo se repitieran en los siguientes. En consecuencia, el sistema pasó de un estado de planificación inicial a un modelo de gestión basado en la mejora continua, donde la variabilidad fue reducida sistemáticamente, garantizando que el cronograma no solo fuera una proyección teórica, sino una herramienta de control real frente a las exigencias operativas y de seguridad del aeropuerto.



Figura 24. Socialización de aprendizaje al final de la Semana 5 en obra

Nota: Fuente – Elaboración Propia

4.11. Sistema Integrado De Control y Seguimiento

Para garantizar que la metodología de Last Planner System fuera auditable y transparente, se estableció un Sistema Integrado de Control y Seguimiento (SICS). Este sistema no se limitó a la recolección de datos, sino que funcionó como un tablero de mando gerencial para la toma de decisiones basadas en evidencia. El objetivo central fue cuantificar la fiabilidad de la planificación y la variabilidad en los procesos constructivos de la calle de rodaje Alfa."

4.11.1. Indicadores De Gestión De Fiabilidad

El desempeño del sistema se evaluó mediante métricas que permiten medir tanto el cumplimiento como la causa raíz de las desviaciones:

- **Porcentaje de Plan Completado (PPC):** Es el indicador clave de fiabilidad del sistema. Se calculó semanalmente como el cociente entre el número de tareas completadas según lo comprometido y el número total de tareas programadas en la semana. Este indicador refleja qué tan confiables son los compromisos adquiridos por los subcontratistas en las reuniones de planificación.
- **Causas de No Cumplimiento (CNC):** Clasificación cualitativa y cuantitativa de las razones por las cuales no se cumplieron los compromisos. Este registro permitió identificar patrones de falla (ej. logística de materiales, interferencia aeroportuaria,

falta de personal) y priorizar las acciones correctivas en el ciclo de planificación siguiente.

4.11.2. Indicadores De Desempeño Operativo

- Índice de Desempeño del Cronograma (SPI): Definido por la relación entre el Valor Ganado (EV) y el Valor Planificado (PV), este indicador permitió identificar si el proyecto avanzaba a la velocidad requerida para cumplir con la fecha de entrega final, aislando el impacto de la variabilidad operativa en la rentabilidad del proyecto.
- Índice de Desempeño del Costo (CPI): Relación entre el Valor Ganado (EV) y el Costo Real (AC). Este indicador fue fundamental para validar que las medidas correctivas implementadas tras las reuniones semanales no comprometieran el margen de utilidad previsto por la empresa constructora.

Variación del Cronograma (SV) y Variación del Costo (CV): Métricas absolutas que cuantificaron, en unidades monetarias, el impacto del cumplimiento de los hitos y de la gestión de restricciones en la salud financiera de la obra.

4.11.3. Sinergia Metodológica: LPS + EVM

La fortaleza de este sistema radica en la correlación entre el PPC y el SPI. Mientras que el PPC actúa como un indicador 'líder' (predictivo del desempeño futuro de la obra), el SPI funciona como un indicador 'rezagado' (que confirma el impacto financiero de las decisiones tomadas). Esta sinergia permitió que, ante una caída en el PPC (indicador de fallas en la planificación semanal), se actuara de forma preventiva para evitar una caída en el CPI o SPI, protegiendo así los objetivos contractuales y económicos de la Etapa 2.

5. Análisis De Resultados y Discusión

5.1. Introducción Al Capítulo

El procesamiento de los datos recolectados durante la Etapa 2 se fundamentó en la integración de flujos de información operativa y financiera. En el componente operativo, se tabularon los registros semanales del Porcentaje de Plan Completado (PPC) y de las Causas de No Cumplimiento (CNC). Esta tabulación permitió cuantificar la fiabilidad del sistema de planificación y la estabilidad del flujo de trabajo. En el componente financiero, la gestión del Valor Ganado (EVM) integró tres dimensiones: el avance físico ejecutado, los registros contables de costos reales (AC) y el valor planificado (PV) derivado del cronograma maestro.

La consolidación de estos datos permitió validar la metodología propuesta mediante la contrastación de la eficiencia operativa frente al desempeño económico, lo que aporta consistencia técnica a los resultados presentados a continuación.

Adicionalmente, la investigación incorporó una matriz de indicadores de productividad para evaluar la eficiencia en el uso de los recursos y el ritmo de avance físico. En primer lugar, se estableció el Índice de Cumplimiento de Plazos, definido por la relación porcentual entre el avance ejecutado y el programado, con el fin de medir la adherencia al cronograma maestro. En cuanto al rendimiento operativo, se monitoreó la Productividad de Colocación (losas/día) como indicador de ritmo constante (takt time). Finalmente, se cuantificó la intensidad de recursos mediante los ratios de Horas-Hombre (H-H) y Horas-Máquina (H-M) por unidad de medida, permitiendo correlacionar la estabilidad del flujo lograda mediante el LPS con la optimización de los consumos unitarios en campo.

5.2. Análisis De Fiabilidad De La Planificación (Operativo)

5.2.1. Evolución Del Porcentaje De Plan Completado (PPC)

El análisis del Porcentaje de Plan Completado (PPC) revela la dinámica de estabilización del sistema de producción bajo las premisas del Last Planner System. El proyecto inició con una fiabilidad del 83%, la cual sufrió una caída pronunciada en la Semana 2 hasta alcanzar un valor mínimo del 43%.

Esta fluctuación evidencia el impacto de la variabilidad externa y la debilidad inicial en la protección de la producción (shielding production). A partir de la Semana 3, la respuesta del

sistema muestra una recuperación sostenida, con una estabilización en niveles superiores al 90% y una meseta de eficiencia del 100% durante las últimas tres semanas.

Este comportamiento sugiere que la implementación de procesos de retroalimentación y el aprendizaje del equipo permitieron reducir el desfase entre lo que 'debe' hacerse y lo que realmente 'puede' hacerse. El resultado fue un flujo de trabajo predecible y fiable.

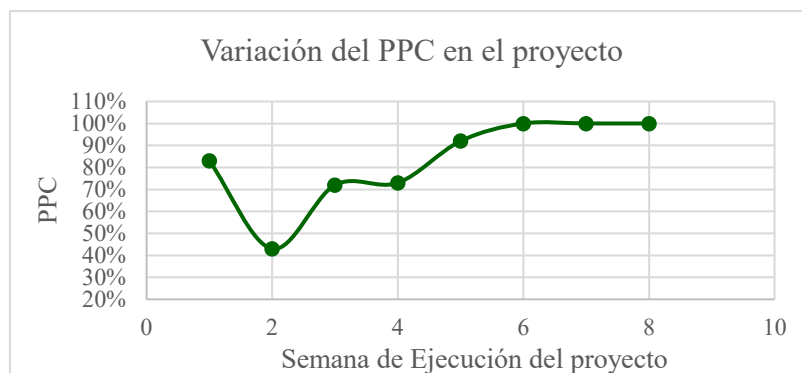


Figura 25. Variación del PPC en la Etapa 2

Nota: Fuente- Elaboración Propia

5.2.2. Análisis De Las Causas De No Cumplimiento (CNC)

Para identificar las fuentes de variabilidad que afectaron la fiabilidad del sistema, se realizó un análisis de Pareto sobre las 42 ocurrencias de incumplimiento detectadas. Los resultados revelan que el 78.6% de las fallas se concentran en cinco causas vitales.

Categoría CNC	SIGLA
No liberación de módulo (subrasante no conformada)	NLM (SR)
Concreto con mayor resistencia (bajo rendimiento demolición/perforación)	CCMR
No liberación de módulo (excavación incompleta en la semana)	NLM (EXC)
Condiciones climáticas (lluvia)	CCLIM
No liberación de frente (losas etapa anterior sin fundir)	NLM (FUND)
No liberación de módulo (demolición previa incompleta)	NLM (DMC)
No liberación de módulo (cortes de losa no realizados)	NLM (CRT)
No liberación de módulo (subbase no completada)	NLM (SBB)

Tabla 4. Resumen de Siglas para las CNC generadas en la Etapa 2

Nota: Fuente – Elaboración Propia

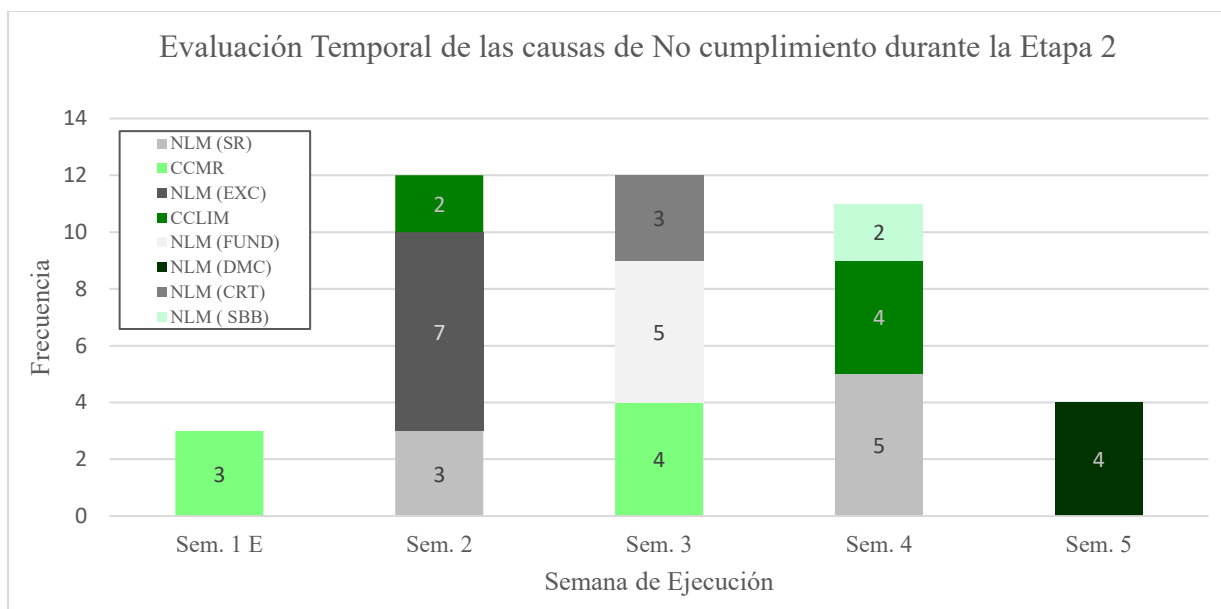


Figura 26. Evaluación Temporal de las CNC durante la Etapa 2

Nota: Fuente – Elaboración Propia

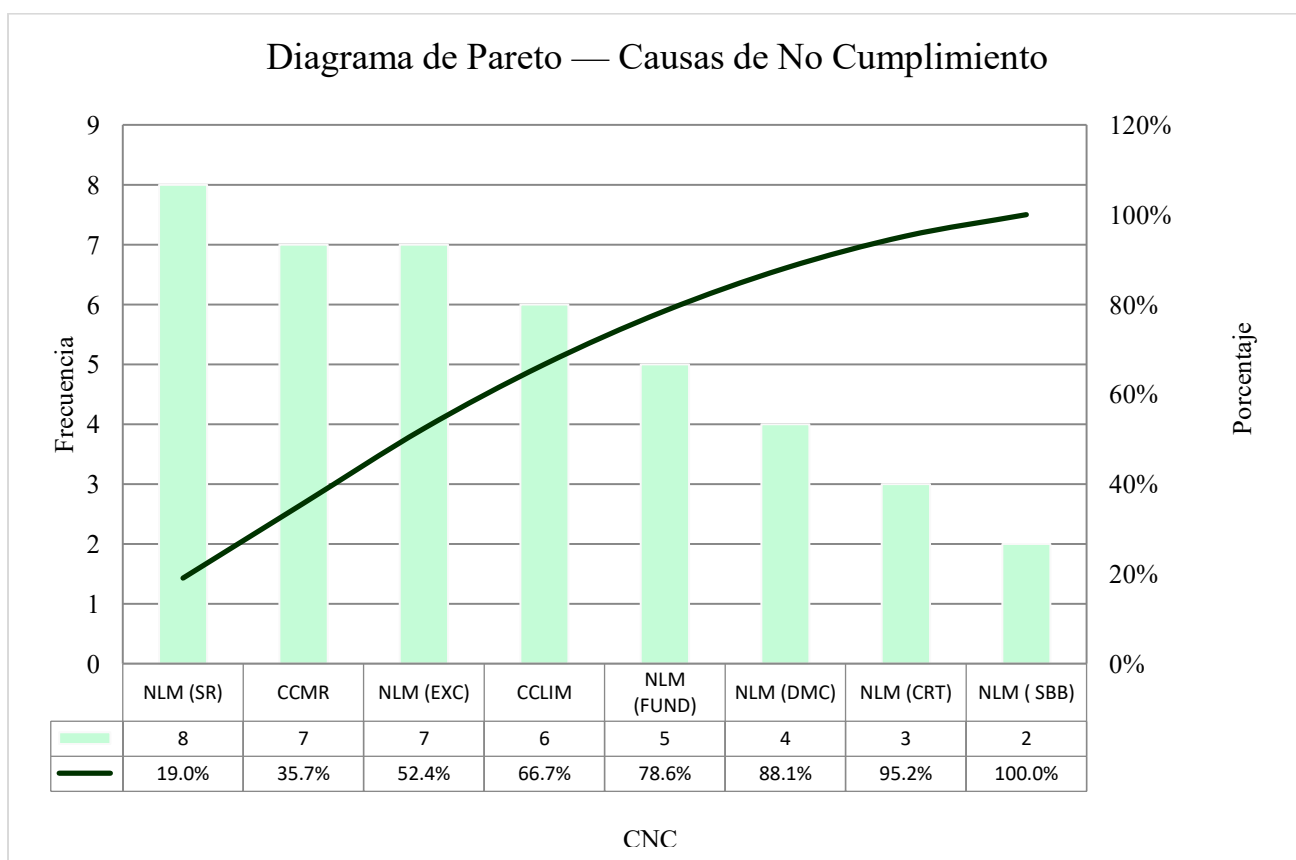


Figura 27. Diagrama de Pareto – Causas de No Cumplimiento

Nota: Fuente – Elaboración Propia

Las dos causas más recurrentes son 'No liberación de módulo por subrasante no conformada' (19%) y 'No liberación por excavación incompleta' (16.7%). Este patrón sugiere que el flujo de producción se vio interrumpido por fallos en las interdependencias de las actividades precedentes, lo cual corresponde, en el marco de Lean Construction, a una deficiencia en el proceso de liberación de restricciones.

Adicionalmente, destaca el impacto del 'Concreto con mayor resistencia' (16.7%), un factor técnico que redujo los rendimientos de demolición previstos. Este hallazgo evidencia una brecha entre las condiciones asumidas en la planificación y la realidad física del campo.

La combinación de estos factores internos, sumada a condiciones climáticas adversas (14.3%), explica la volatilidad del PPC observada en las etapas iniciales del proyecto.

El análisis temporal de las CNC complementa el diagrama de Pareto al revelar la evolución del aprendizaje operativo en el frente de obra. Durante la Semana 2 se identifica una concentración de fallos asociados a la 'Excavación incompleta', con 7 ocurrencias. Este factor actuó como el principal cuello de botella y redujo la fiabilidad del sistema.

En las semanas 1 y 3 se observa la presencia intermitente de la variable 'Concreto con mayor resistencia', lo cual exigió un ajuste en los rendimientos de perforación previstos.

A partir de la Semana 5 se registra una reducción sustancial en la diversidad y frecuencia de las CNC, las cuales se limitan únicamente a fallos por 'Demolición previa incompleta'. Esta tendencia decreciente confirma que las sesiones de planificación colaborativa permitieron anticipar las restricciones de liberación de módulos. En consecuencia, en el último tercio del periodo evaluado (Semanas 6 a 8) el sistema operó con un flujo libre de interrupciones.

5.2.3. Estabilidad del Flujo de Trabajo

La transición desde la volatilidad observada en la Semana 2 (PPC = 43%) hacia la estabilidad absoluta del último tercio del proyecto (PPC = 100%) encuentra su sustento metodológico en la maduración del proceso de Lookahead Planning con horizonte de dos semanas (2WLAP). En el marco de la teoría de producción de Lean Construction, este nivel de planificación intermedia actuó como un filtro de calidad encargado del 'blindaje de la producción' (shielding production).

El análisis de los datos sugiere que, durante las fases iniciales, el sistema operaba bajo un modelo reactivo donde las restricciones, principalmente fallos en la liberación de módulos por excavaciones incompletas y variaciones en la resistencia del concreto, impactaban

directamente el Plan de Trabajo Semanal (WWP). Sin embargo, la implementación sistemática del 2WLAP permitió que estas restricciones fueran identificadas y mitigadas con 14 días de antelación. Este proceso de 'Hacer Listo' (Make Ready) garantizó que solo aquellas tareas libres de impedimentos logísticos o técnicos fueran comunicadas a los últimos planificadores.

Un componente determinante en esta estabilización, aunque no fue objeto de una medición cuantitativa formal, fue la optimización cualitativa en los tiempos de solicitud de materiales. La visibilidad otorgada por el horizonte de dos semanas permitió al equipo de obra prever los requerimientos de suministros con mayor antelación, mitigando el riesgo de quiebres de stock. En consecuencia, la reducción de la variabilidad semanal no fue un evento fortuito, sino el resultado de haber incrementado la predecibilidad del flujo y la alineación logística, eliminando de forma sistemática el desperdicio por esperas y asegurando la continuidad física de la obra en un entorno de alta exigencia operativa.

5.3. Análisis De Desempeño Financiero y De Cronograma (EVM)

El presente análisis aplica la metodología de Gestión del Valor Ganado (EVM, por sus siglas en inglés) para evaluar el desempeño en costo y cronograma del proyecto de construcción objeto de estudio. El análisis se estructura en tres escenarios: el proyecto en su totalidad (Etapas 1 y 2 de forma conjunta), la Etapa 1 de manera independiente y la Etapa 2 de forma independiente. Esta segmentación permite identificar los patrones de desempeño propios de cada fase y establecer una base de comparación para evaluar el impacto de la implementación del Last Planner System (LPS) durante la Etapa 2.

La metodología EVM utiliza tres valores fundamentales para el cálculo de los indicadores de desempeño:

- El Valor Planeado (PV) corresponde al costo presupuestado del trabajo programado hasta una fecha de corte determinada. El Valor Ganado (EV) representa el costo presupuestado del trabajo efectivamente ejecutado. El Costo Real (AC) es el costo real incurrido por el trabajo realizado. A partir de estos tres valores se derivan los indicadores de variación (CV y SV) y los índices de desempeño (CPI y SPI).
- El Presupuesto hasta la Conclusión (BAC) para el proyecto completo es de COP \$4,060,694,865. Para la Etapa 1 independiente, el BAC asciende a COP \$3,265,124,397, y para la Etapa 2 a COP \$795,570,468.

5.3.1. Resumen De Indicadores

La siguiente tabla presenta los indicadores clave al cierre de cada escenario analizado. Las celdas en verde indican valores favorables ($CPI \geq 1.0$); las celdas en rojo indican desempeño deficiente.

Indicador	Proyecto completo	Etapas 1 (sin LPS)	Etapas 2 (con LPS)
Semanas analizadas	21	13	9
BAC (COP)	\$4,060,694,865	\$3,265,124,397	\$795,570,468
EAC final (COP)	\$3,369,765,212	\$2,759,018,426	\$610,746,785
CPI promedio	1.049	0.975	1.143
CPI final	1.205	1.183	1.303
SPI promedio	1.002	1.005	0.992
SPI final	1.000	1.000	1.000
CV final (COP)	\$690,929,653	\$506,105,971	\$184,823,683
SV final (COP)	\$0	\$0	\$0
Semanas con $CPI < 1$	8 de 21	8 de 13	3 de 9
Semanas con $SPI < 1$	11 de 21	8 de 13	4 de 9

Tabla 5. Resumen de Indicadores EVM del Proyecto

Nota: Fuente – Elaboración Propia

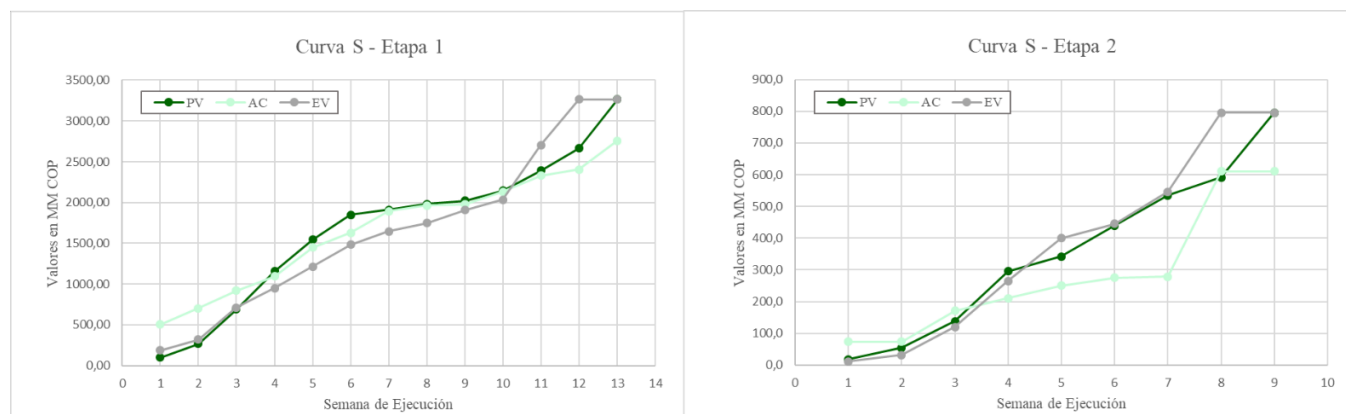


Figura 28. Curvas S en Etapas 1 y 2

Nota: Fuente – Elaboración Propia

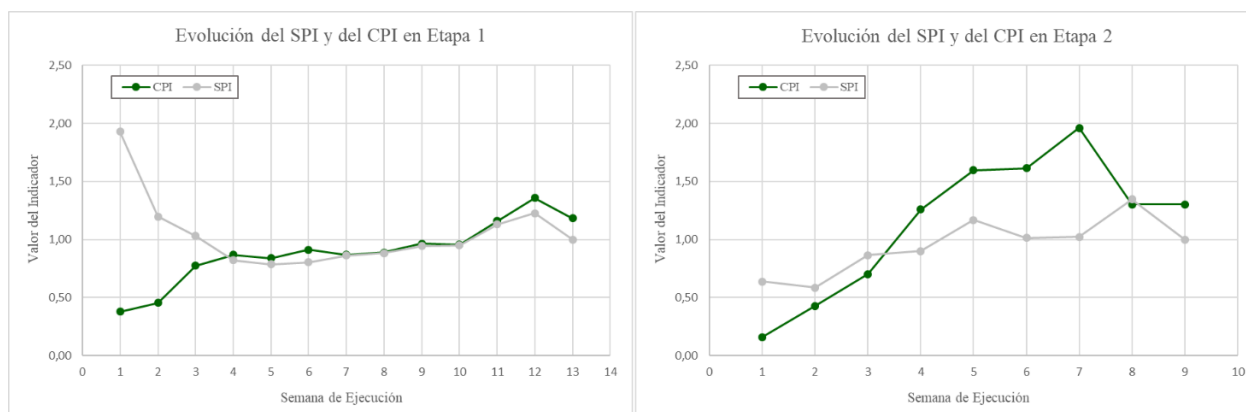


Figura 29. Evolución del SPI y del CPI en Etapas 1 y Etapa 2 del proyecto

Nota: Fuente – Elaboración Propia

- **Análisis del Proyecto Completo:** El análisis conjunto de las dos etapas abarca 21 semanas de ejecución. Durante las primeras diez semanas el proyecto registró un desempeño en costos significativamente deficiente, con un CPI mínimo de 0.377 en la Semana 1, lo que indica que por cada peso invertido se obtuvo apenas \$0.38 de valor ganado. Esta situación se explica, en parte, por los altos costos de movilización y el desfase inicial entre las actividades planificadas y las realmente ejecutadas.

A partir de la Semana 11 el CPI superó la unidad y se mantuvo por encima de 1.0 hasta el cierre, alcanzando un valor final de 1.205. Esto implica que, al término del proyecto, el trabajo realizado generó más valor del que costó en términos presupuestados, lo que se refleja en una Variación de Costo (CV) positiva de COP \$690,929,653 al cierre.

En cuanto al cronograma, el SPI mostró una tendencia inversa: fue superior a 1.0 en las primeras semanas (se avanzó más de lo planeado), pero cayó por debajo de la unidad entre las Semanas 4 y 10, indicando atrasos en la ejecución. A partir de la Semana 11 el SPI se recuperó y el proyecto cerró exactamente en SPI = 1.000, es decir, con el 100% del alcance ejecutado conforme al cronograma base.

El Estimado al Completar (EAC) final fue de COP \$3,369,765,212, un valor inferior al BAC de \$4,060,694,865, lo que refleja una ejecución más eficiente en costos de lo inicialmente presupuestado en el escenario agregado.

- **Análisis de la Etapa 1**

La Etapa 1 comprende 13 semanas de seguimiento con un BAC de COP \$3,265,124,397. Esta etapa fue ejecutada sin la implementación de herramientas de

Lean Construction, lo que constituye el escenario de referencia (línea base) para la comparación con la Etapa 2.

El comportamiento del CPI en la Etapa 1 puede dividirse en dos fases claramente diferenciadas. Durante las primeras diez semanas, el índice se mantuvo sistemáticamente por debajo de 1.0, con valores que oscilaron entre 0.377 (S1) y 0.965 (S9). Esta fase refleja un período de ineficiencia en costos sostenida, donde el costo real superaba continuamente el valor del trabajo ejecutado.

A partir de la Semana 11 el CPI superó 1.0 de manera consistente, llegando a un máximo de 1.358 en la Semana 12, y cerrando en 1.183 en la Semana 13. Esta recuperación tardía elevó el promedio del CPI a 0.975 para toda la etapa. La Variación de Costo al cierre fue positiva: COP \$506,105,971, con un EAC de \$2,759,018,426.

De las 13 semanas analizadas, 8 presentaron CPI inferior a 1.0, lo que equivale al 61.5% del período. Esto evidencia que la mayor parte de la ejecución de la Etapa 1 estuvo marcada por sobrecostos respecto al valor ganado.

El SPI de la Etapa 1 mostró un patrón similar al del costo. En las Semanas 1 a 3 fue favorable ($SPI > 1.0$), indicando un avance acelerado. Sin embargo, entre las Semanas 4 y 10 el índice cayó por debajo de la unidad, con un mínimo de 0.787 en la Semana 5, lo que refleja retrasos significativos respecto al cronograma planeado.

La recuperación del cronograma se produjo en las Semanas 11 y 12, y la etapa cerró con $SPI = 1.000$ en la Semana 13, indicando que el alcance total fue completado conforme al plan base. A pesar del cierre en tiempo, el período de rezago entre las Semanas 4 y 10 generó presiones en la ejecución que se reflejan en los sobrecostos registrados en el mismo período.

Indicador	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
CPI	0.377	0.454	0.775	0.868	0.840	0.911	0.869	0.889	0.965	0.956	1.159	1.358	1.183
SPI	1.929	1.197	1.031	0.820	0.787	0.803	0.861	0.883	0.944	0.949	1.130	1.225	1.000

Tabla 6. Indicadores CPI y SPI a lo largo de la Etapa 1

Nota: Fuente: Elaboración Propia

- Análisis de la Etapa 2

La Etapa 2 comprende 9 semanas de seguimiento con un BAC de COP \$795,570,468. En esta etapa se implementó el Last Planner System como metodología de planificación colaborativa y control de la producción.

Al igual que en la Etapa 1, la Etapa 2 inició con un CPI bajo: 0.158 en la Semana 1. Sin embargo, la recuperación fue notablemente más rápida. En la Semana 4 el CPI ya superó 1.0 (alcanzando 1.257), y a partir de ese punto se mantuvo consistentemente por encima de la unidad durante el resto de la etapa.

El CPI máximo registrado fue de 1.960 en la Semana 7, y el valor final al cierre fue de 1.303. El promedio del CPI para la Etapa 2 fue de 1.143, considerablemente superior al promedio de 0.975 registrado en la Etapa 1. Solo 3 de las 9 semanas (33.3%) presentaron CPI inferior a 1.0, en contraste con el 61.5% observado en la Etapa 1.

La Variación de Costo al cierre fue positiva: COP \$184,823,683, con un EAC final de \$610,746,785, inferior al BAC de \$795,570,468.

El SPI de la Etapa 2 presentó valores inferiores a 1.0 durante las primeras cuatro semanas, con un mínimo de 0.584 en la Semana 2. Este rezago inicial también se observó en la Etapa 1, lo que sugiere que es una característica inherente a las condiciones de arranque del proyecto.

La recuperación del cronograma fue progresiva: a partir de la Semana 5 el SPI superó 1.0 de manera sostenida, llegando a 1.346 en la Semana 8. La etapa cerró con SPI = 1.000 en la Semana 9, completando el 100% del alcance en el tiempo programado.

Indicador	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
CPI	0.158	0.427	0.701	1.257	1.598	1.614	1.960	1.303	1.303
SPI	0.639	0.584	0.864	0.898	1.169	1.013	1.022	1.346	1.000

Tabla 7. Indicadores CPI y SPI en la Etapa 2 del proyecto

Nota: Fuente – Elaboración Propia

- Comparación entre Etapas 1 y 2

Al contrastar los indicadores de ambas etapas se observan diferencias relevantes en tres dimensiones principales.

En cuanto a la eficiencia en costos, la Etapa 2 presentó un CPI promedio de 1.143 frente a 0.975 en la Etapa 1, lo que representa una mejora de aproximadamente 17 puntos porcentuales. Además, el porcentaje de semanas con CPI inferior a 1.0 se redujo del 61.5% al 33.3%, lo que indica mayor consistencia en el desempeño presupuestario.

En cuanto a la velocidad de recuperación, aunque ambas etapas iniciaron con CPI bajo, la Etapa 2 superó la unidad en la Semana 4 (a las 4 semanas de inicio), mientras que la Etapa 1 lo logró recién en la Semana 11 (a las 11 semanas de inicio). Esta diferencia en la velocidad de corrección es uno de los aspectos más relevantes del análisis comparativo.

En cuanto al desempeño del cronograma, ambas etapas cerraron con $SPI = 1.000$, lo que indica que en los dos casos se completó el alcance dentro del tiempo programado. Sin embargo, la Etapa 2 presentó un período de rezago más corto, con recuperación del cronograma a partir de la Semana 5, frente a la Semana 11 en la Etapa 1.

En términos de los valores absolutos, las diferencias en CPI y SV entre etapas deben interpretarse con cautela dado que el tamaño de cada etapa es distinto (la Etapa 1 representa aproximadamente el 80% del presupuesto total del proyecto). No obstante, los indicadores adimensionales como el CPI y el SPI permiten una comparación directa del desempeño relativo independientemente del tamaño de cada fase.

El análisis de los indicadores EVM para ambas etapas permite identificar los siguientes patrones de comportamiento en el proyecto de construcción estudiado.

Primero, se observa que ambas etapas presentaron un arranque con CPI bajo, situación que es frecuente en proyectos de construcción durante las primeras semanas debido a los costos de anticipos, la curva de aprendizaje del equipo y los desfases entre la activación de contratos y el avance efectivo de obra.

Segundo, en la Etapa 1 el período de bajo desempeño en costos se prolongó hasta la Semana 10, abarcando la mayor parte de la ejecución. En la Etapa 2 este período se redujo significativamente, con recuperación evidente a partir de la Semana 4.

Tercero, ambas etapas cerraron con el alcance total ejecutado ($SPI = 1.000$) y con costos reales inferiores al presupuesto base ($CPI > 1.0$ al cierre), lo que refleja una capacidad de recuperación en el tramo final de cada fase.

Cuarto, el proyecto en su conjunto cerró con un EAC de COP \$3,369,765,212, un valor inferior al BAC de \$4,060,694,865, con una Variación de Costo positiva de \$690,929,653, indicando que el proyecto fue ejecutado de manera más eficiente de lo presupuestado en términos globales.

5.4. Sinergia Entre La Gestión Operativa y La Financiera

5.4.1. Correlación Entre El PPC y El SPI

El Porcentaje de Plan Completado (PPC) es el indicador central del Last Planner System. Mide la proporción de actividades comprometidas en el plan semanal que fueron efectivamente completadas, y constituye una medida directa de la confiabilidad de la planificación a corto plazo. En esta sección se analiza su comportamiento en relación con el SPI durante las ocho semanas de ejecución de la Etapa 2, período en el cual el proyecto fue completado en su totalidad. El SPI de la Semana 9 (= 1.000) corresponde únicamente al cierre formal de la etapa, sin actividad productiva asociada, por lo que no cuenta con un PPC correspondiente y se excluye de este análisis.

La siguiente tabla presenta los valores semanales de PPC y SPI para las ocho semanas activas de la Etapa 2, junto con una evaluación conjunta de la tendencia de ambos indicadores. El color verde indica valores favorables ($PPC \geq 80\%$ / $SPI \geq 1.0$), el rojo indica desempeño deficiente, y el amarillo indica un comportamiento mixto entre los dos indicadores.

Tabla 8
Evolución del PPC y del SPI a lo largo de la Etapa 2

Indicador	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
PPC (%)	83%	43%	72%	73%	92%	100%	100%	100%
SPI	0.639	0.584	0.864	0.898	1.169	1.013	1.022	1.346
Tendencia	Parcial	Ambos bajos	Ambos bajos	Ambos bajos	Ambos OK	Ambos OK	Ambos OK	Ambos OK

Nota: Fuente – Elaboración Propia

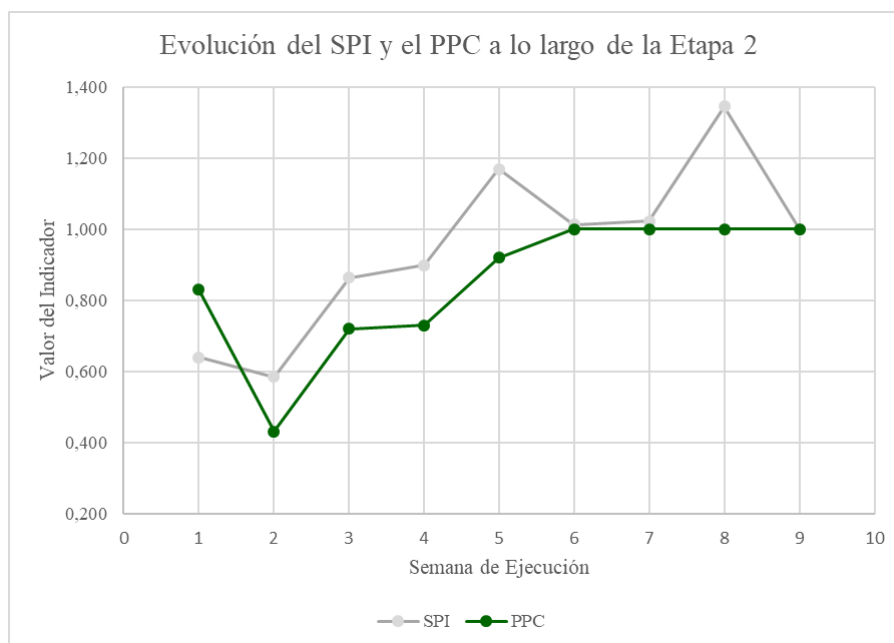


Figura 30. Evolución del SPI y el PPC a lo largo de la Etapa 2

Nota: Fuente – Elaboración Propia

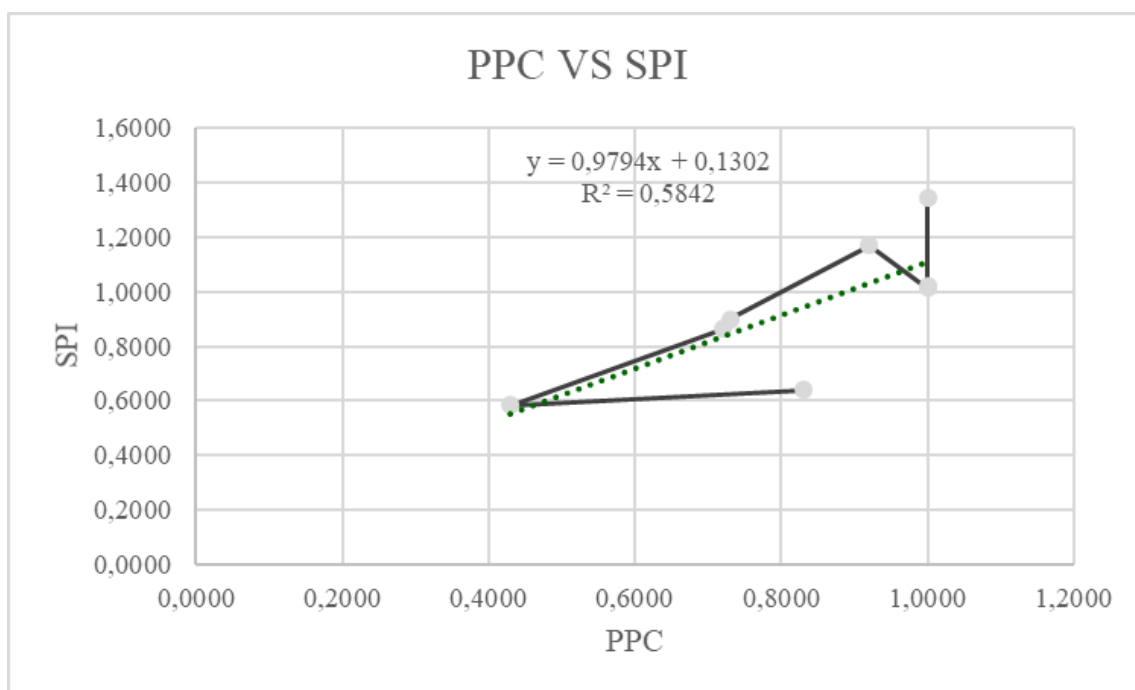


Figura 31. Gráfico de relación PPC vs SPI

Nota: Fuente – Elaboración Propia

Durante las primeras cuatro semanas se observa que ambos indicadores presentaron valores desfavorables de forma simultánea. El caso más crítico corresponde a la Semana 2, con un PPC de apenas 43% y el SPI más bajo de la etapa (0.584), lo que refleja un período de baja confiabilidad en la planificación y atraso acumulado respecto al cronograma base.

A partir de la Semana 5 la situación se revierte de manera sostenida. El PPC superó el 90% y el SPI cruzó la barrera de 1.0 de forma estable. Las Semanas 6, 7 y 8 registraron PPC = 100%, mientras el SPI se mantuvo entre 1.013 y 1.346, lo que indica que en la fase de madurez del LPS el equipo ejecutó más trabajo del planeado con una confiabilidad de cumplimiento perfecta.

Con el fin de cuantificar la relación entre la confiabilidad del plan semanal (PPC) y el desempeño del cronograma acumulado (SPI), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas series para las ocho semanas del período activo.

Estadístico	Valor	Interpretación
Coeficiente de Pearson (r)	0.764	Correlación positiva moderada-alta
Coeficiente de determinación (R²)	0.584	El PPC explica el 58.4% de la varianza del SPI
Estadístico t (gl = 6)	2.901	Significativo al nivel del 5% (t crítico = 2.447)
Media PPC	82.9%	Por encima del umbral de referencia del 80%
Media SPI (S1–S8)	0.942	Ligeramente por debajo de 1.0 en el período activo

Tabla 9. Tabla de valores estadísticos de correlación PPC vs SPI

Nota: Fuente – Elaboración Propia

El coeficiente de Pearson obtenido fue $r = 0.764$, lo que indica una correlación positiva moderada-alta entre el PPC y el SPI. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.584$ señala que aproximadamente el 58.4% de la variabilidad observada en el SPI puede ser explicada por el comportamiento del PPC en el mismo período. El estadístico $t = 2.901$ con 6 grados de libertad es estadísticamente significativo al nivel del 5% (valor crítico = 2.447), lo que permite rechazar la hipótesis nula de ausencia de correlación.

Este resultado es coherente con el marco teórico del Last Planner System: una mayor confiabilidad en la planificación semanal (PPC elevado) se asocia con un mejor desempeño del cronograma acumulado (SPI mayor). Sin embargo, es importante notar que la correlación no es perfecta ($r < 1.0$). Esto se explica por la naturaleza acumulativa del SPI. Este indicador integra el desempeño de todas las semanas anteriores, por lo que registra con rezago los efectos de mejoras recientes en el PPC. Esto es especialmente visible en la Semana 5, donde el PPC ya

ascendió al 92% pero el SPI apenas comenzaba a recuperarse del rezago acumulado en las semanas previas.

El análisis de correlación presentado debe interpretarse con tres consideraciones metodológicas:

- **Tamaño muestral reducido.**

El número de observaciones ($n = 8$) limita la robustez estadística de los resultados, aunque el nivel de significancia alcanzado es satisfactorio para el contexto de un estudio de caso.

- **Diferencia conceptual entre indicadores.**

El PPC y el SPI miden fenómenos relacionados pero distintos. El PPC evalúa el cumplimiento del plan a nivel de tarea individual en el corto plazo, mientras que el SPI evalúa el avance físico acumulado respecto al cronograma base en el largo plazo.

- **Desfase temporal entre indicadores.**

El SPI responde con rezago a los cambios en el PPC. Esto sugiere que una correlación cruzada con rezago de una semana podría arrojar resultados más elevados, lo cual podría abordarse en análisis complementarios.

Estos resultados aportan evidencia indicativa sobre la primera dimensión de la proposición de viabilidad planteada en el Capítulo 1 (fiabilidad del flujo) y su relación con la segunda dimensión (desempeño temporal). Su interpretación se enmarca dentro del alcance metodológico del estudio de caso único.

5.5. Discusión De Resultados y Lecciones Aprendidas

5.5.1. Impacto En La Seguridad Operacional

La integridad de las operaciones aeroportuarias durante la ejecución del proyecto constituyó uno de los indicadores de éxito principales de la metodología integrada. Los resultados arrojan un balance de cero incidentes y accidentes en el área de movimiento durante ambas etapas de intervención. Este desempeño no se atribuye a factores fortuitos, sino a la sinergia entre la zonificación operativa y la planificación colaborativa.

Bajo el enfoque de Lean Construction, la zonificación actuó como una restricción física de seguridad que delimitó los flujos de maquinaria y personal, mitigando el riesgo de incursiones en pista o áreas activas. Por su parte, el Last Planner System garantizó que cada actor comprendiera tanto sus tareas como las interfaces espaciales y temporales de su trabajo.

Al reducir la variabilidad operativa y estabilizar el flujo, se eliminaron las condiciones de apremio o improvisación que suelen preceder a los eventos de seguridad. En consecuencia, la metodología evidencia que una producción predecible es, por definición, una producción segura, asegurando la continuidad operativa del aeropuerto sin comprometer los rendimientos de obra.

5.6. Verificación De La Proposición De Viabilidad

A la luz de los resultados expuestos en las secciones anteriores, se verifica el cumplimiento de las tres dimensiones planteadas en la proposición de viabilidad del Capítulo

5.6.1. Fiabilidad Del Flujo.

El Porcentaje de Plan Completado promedio durante las ocho semanas activas de la Etapa 2 fue de 82.9%, superior al umbral de referencia del 80%. En las últimas tres semanas, el PPC se estabilizó en 100%, evidenciando la maduración del proceso de remoción anticipada de restricciones.

5.6.2. Desempeño Financiero y Temporal.

Al cierre de la Etapa 2, el CPI alcanzó un valor de 1.303 y el SPI de 1.000. La velocidad de recuperación del CPI fue significativamente superior en la Etapa 2 (semana 4) frente a la Etapa 1 (semana 11). Adicionalmente, la correlación positiva entre el PPC y el SPI ($r = 0.764$; $R^2 = 0.584$; $p < 0.05$) confirmó la relación entre fiabilidad operativa y cumplimiento del cronograma propuesta por el marco teórico del LPS.

5.6.3. Productividad Operativa y Seguridad.

La Etapa 2 registró un incremento del 16.8% en la productividad física, con una reducción del 12.4% en el consumo H-H y del 12.2% en H-M, frente a la línea base. La obra culminó con cero incidentes en el área de movimiento y un 100% de cumplimiento en los ensayos de calidad.

La verificación simultánea de las tres dimensiones permite responder afirmativamente al objetivo general de la investigación: la aplicación adaptada del Last Planner System en la rehabilitación de pavimentos rígidos aeroportuarios es viable y mejora el desempeño operativo, financiero y de seguridad del proyecto frente al modelo de gestión tradicional, dentro del alcance del caso de estudio analizado.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Las siguientes conclusiones se derivan del análisis empírico y estadístico de los datos recolectados durante las dos etapas operativas del proyecto, y dan respuesta directa a los objetivos planteados al inicio de esta investigación, así como a la proposición de viabilidad enunciada en la sección 1.3.3.

6.1.1. Conclusión 1. Sobre La Identificación Del Estado Inicial (Objetivo Específico 1).

El diagnóstico del modelo de gestión tradicional (Etapa 1) mediante el cálculo de KPI's permitió cuantificar empíricamente la resiliencia del enfoque de empuje (Push). Si bien la dinámica financiera del proyecto justifica un CPI inicial bajo, derivado de los costos naturales de movilización y anticipos, se evidenció que el sistema tradicional carecía de agilidad para recuperar su línea base ante las perturbaciones aeroportuarias. Esta vulnerabilidad se reflejó en un CPI deficiente durante el 61.5% del periodo evaluado, requiriendo 11 semanas para estabilizar el cronograma. La línea base confirmó la necesidad técnica de transitar hacia un modelo fundamentado en el flujo.

6.1.2. Conclusión 2. Sobre La Aplicación Del Sistema En Un Entorno Restringido (Objetivo Específico 2).

La aplicación del Last Planner System demostró que la planificación colaborativa es capaz de absorber las restricciones logísticas de seguridad operacional sin comprometer el cronograma maestro. El uso del Lookahead (2WLAP) operó como filtro de fiabilidad previo a la movilización de recursos, logrando que la zonificación impuesta por la autoridad aeroportuaria dejara de ser un factor de retraso para convertirse en un parámetro de control. Asimismo, el análisis sistemático de las Causas de No Cumplimiento (CNC) generó una base de datos de aprendizaje organizacional, reduciendo la recurrencia de errores en los frentes de trabajo subsiguientes y llevando el sistema de un 43% de fiabilidad inicial al 100% en el último tercio del proyecto.

6.1.3. Conclusión 3. Sobre La Evaluación Comparativa Del Desempeño (Objetivo Específico 3).

La comparación paramétrica entre etapas confirma la superioridad del modelo Lean en las tres dimensiones evaluadas. En productividad operativa, la Etapa 2 registró un incremento del 16.8% en el rendimiento físico, con una reducción del 12.4% en el consumo H-H y del

12.2% en H-M. En fiabilidad del flujo, el PPC actuó como indicador líder eficaz, con un valor promedio de 82.9% y estabilización en 100% en las últimas tres semanas. En desempeño financiero y temporal, se comprobó estadísticamente ($r = 0.764$; $R^2 = 0.584$; $p < 0.05$) que cada incremento en la fiabilidad de los compromisos semanales se tradujo en una estabilización directa del SPI y en una recuperación del CPI en apenas 4 semanas, frente a las 11 semanas requeridas en la Etapa 1.

6.1.4. Conclusión 4. Sobre La Integración LPS + EVM.

La articulación entre el Last Planner System y la Gestión del Valor Ganado se demostró viable y sinérgica. El PPC funcionó como leading indicator del desempeño operativo y los índices CPI y SPI como lagging indicators del impacto financiero y temporal. Esta integración ofrece un marco de control que reconcilia la gestión de la variabilidad en campo con los requerimientos corporativos de reporte de desempeño, atendiendo simultáneamente las necesidades del equipo de obra y de la dirección del proyecto.

6.1.5. Conclusión 5. Sobre La Seguridad Operacional y La Calidad Técnica.

La obra culminó con cero accidentes en el área de movimiento y un 100% de cumplimiento en los ensayos de calidad. Este resultado evidencia que la estabilización del flujo no compromete los estándares técnicos del producto, sino que los refuerza, al eliminar las condiciones de apremio e improvisación que habitualmente preceden tanto a los eventos de seguridad como a las no conformidades de calidad. Se confirma así que una producción estabilizada es, por construcción, una producción segura y técnicamente conforme.

6.1.6. Conclusión 6. Sobre La Verificación De La Proposición De Viabilidad (Objetivo General).

Los hallazgos empíricos verifican la proposición de viabilidad planteada al inicio de la investigación: la aplicación adaptada del Last Planner System en proyectos de rehabilitación de pavimentos rígidos aeroportuarios es viable, dentro del alcance del caso de estudio analizado. Las tres dimensiones de la proposición (fiabilidad del flujo, desempeño financiero-temporal, productividad y seguridad) se cumplieron simultáneamente y de forma consistente con el marco teórico del LPS. El modelo no solo optimiza el uso de los recursos y protege el presupuesto, sino que garantiza la integridad de la infraestructura y la continuidad de las operaciones aéreas. La investigación aporta evidencia empírica al cuerpo de conocimiento sobre Lean Construction en entornos de alta restricción logística, ámbito en el cual la literatura previa era incipiente.

6.2. Recomendaciones

A continuación, se presentan recomendaciones dirigidas a cuatro tipos de actores, con el propósito de que los hallazgos de esta investigación tengan aplicabilidad práctica en proyectos futuros de infraestructura aeroportuaria y similares.

6.2.1. Para La Empresa Constructora

Se recomienda institucionalizar el uso del 2WLAP como estándar de gestión en proyectos de alta complejidad logística. Para que este sistema funcione, es necesario capacitar a los líderes de frente en la cultura del "compromiso" antes de la ejecución, garantizando que el PPC sea un reflejo real de la capacidad instalada y no una meta impuesta desde la oficina técnica. Adicionalmente, se sugiere construir un repositorio histórico acumulativo de Causas de No Cumplimiento clasificadas por tipo de obra y frente, que sirva como insumo de aprendizaje organizacional para proyectos futuros.

6.2.2. Para La Estructuración De Futuros Proyectos Aeroportuarios

Se recomienda integrar, desde la etapa de licitación, un protocolo de comunicación con la oficina de operaciones del concesionario aeroportuario. Esto garantizará que el Cronograma Maestro contemple desde su origen las ventanas de oportunidad reales para la liberación de frentes, reduciendo el choque entre la necesidad de avance de la obra y los protocolos de Safety de la aviación. Asimismo, se sugiere incorporar la metodología LPS como requisito contractual en pliegos de licitación de obras en zona aire, alineando las expectativas del cliente, el contratista y el operador desde la fase de propuesta. Finalmente, conviene tratar la emisión del NOTAM como el primer hito de la ruta crítica, con un lead time mínimo documentado.

6.2.3. Para La Optimización Del Modelo De Control y La Transparencia Operativa

Se sugiere evolucionar hacia un modelo de control híbrido que respete los principios de la Gestión Visual (Visual Management). Por un lado, se recomienda la digitalización del procesamiento analítico (PPC, CNC y métricas EVM) mediante herramientas en la nube, para agilizar la toma de decisiones gerencial. Por otro lado, se recomienda que estos resultados se materialicen en tableros físicos de actualización diaria, ubicados estratégicamente en el sitio de obra (Gemba). Esta combinación garantiza que la información sobre el flujo de trabajo sea accesible y transparente para todas las cuadrillas y últimos planificadores, evitando que el seguimiento del proyecto dependa exclusivamente de la disponibilidad de dispositivos tecnológicos individuales.

6.2.4. Para Futuras Líneas De Investigación

Dado el alcance acotado del estudio de caso único, se recomienda replicar el análisis en otros aeropuertos del país con condiciones contractuales distintas, para confirmar la consistencia de los hallazgos en contextos comparables. También resultaría valioso extender el estudio a proyectos con duraciones superiores a tres meses, lo que permitiría incrementar el tamaño muestral del análisis estadístico y robustecer la correlación PPC–SPI mediante análisis con rezago temporal. Adicionalmente, se sugiere explorar la integración del LPS con tecnologías BIM 4D y plataformas colaborativas en la nube, así como cuantificar el costo-beneficio de la implementación del LPS (costos de capacitación, software y reuniones frente al ahorro generado), con el fin de construir un caso de negocio replicable para el sector.

7. Referencias bibliográficas

- Alarcón, L. F., Diethelm, S., Rojo, O., & Calderón, R. (2008). Assessing the impacts of implementing lean construction. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(1), 26–33.
- Anbari, F. T. (2003). *Earned value project management method and extensions*. *Project Management Journal*, 34(4), 12-23.
- Ballard, G. (2000). *The last planner system of production control* [Tesis doctoral, University of Birmingham]. <https://leanconstruction.org>
- Ballard, G., & Howell, G. (1998). *Shielding production: Essential step in production control*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(1), 11–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1998\)124:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:1(11))
- Ballard, G., & Tommelein, I. (2020) *Current Process Benchmark for the Last Planner® System of Project Planning and Control*. In *Lean Construction Journal* pp. 53-155. <https://doi.org/10.60164/47e7h7a1b>
- Botero, L. F., & Álvarez, M. E. (2005). Last planner, un avance en la planificación y control de proyectos de construcción: Estudio del caso de la ciudad de Medellín. *Ingeniería y Desarrollo*, (17), 148–159.
- Botero, L. F. (2006). *Construcción sin pérdidas: Análisis de procesos y filosofía Lean Construction* (2.^a ed.). Legis Editores. 26-2.
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Houghton Mifflin.
- Federal Aviation Administration. (2022). *Notice to Air Missions (NOTAMs) for airport operators (Advisory Circular No. 150/5200-28G)*. U.S. Department of Transportation. https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentnumber/150_5200-28
- González, V., Alarcón, L. F., & Mundaca, F. (2007). Investigating the relationship between planning reliability and project performance: A case study. *Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-15)*, 98-108. Michigan, USA.
- Hamzeh, F., Ballard, G., & Tommelein, I. D. (2012). Rethinking Lookahead Planning to Optimize Construction Workflow. *Lean Construction Journal*, 15-34.

- Kim, Y.-W., & Ballard, G. (2010). Management thinking in the earned value method system and the last planner system. *Journal of Management in Engineering*, 26(4), 223–228.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000026](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000026)
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction (CIFE Technical Report No. 72)*.
- Koskela, L. (1999). Management of production in construction: A theoretical view. *Proceedings of the 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-7)*, 241–252. Berkeley, EE. UU.
- Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction* [Tesis doctoral, VTT/Helsinki University of Technology]. Technical Research Centre of Finland.
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., & Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction. En R. Best & G. de Valence (Eds.), *Design and construction: Building in value* (pp. 211–226). Butterworth-Heinemann.
- Low, J., & Scanlon, V. (2012). Case study: Adelaide Airport 2010–11 runways and taxiways overlay project. *Journal of Airport Management*, Henry Stewart Publications 6(4), 339–349.
- Liu, M., & Ballard, G. (2008). Improving labor productivity through production control. *Proceedings of the 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-16)*, 657–666.
- Mossman, A. (2018). *Last Planner: 5 + 1 crucial & collaborative conversations for predictable project production planning*. The Change Business.
<https://www.thechangebusiness.co.uk>
- Project Management Institute. (2021). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide) (7.^a ed.). PMI. 191 -196.
- Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002). *Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference*. Houghton Mifflin.
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2021). *Reglamentos Aeronáuticos de Colombia* (RAC).
https://www.aerocivil.gov.co/autoridad_aeronautica/normatividad/13-reglamentos-aeronauticos-de-colombia-rac

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6.^a ed.). SAGE Publications.